



UNIVERSITAS INDONESIA

Analisa Kurva Aliran Fluida Dengan Menggunakan Piezoactuator
Pelat Datar

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Eldwin Dipta Widyasa

0606077743

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK PERKAPALAN

DEPOK

JANUARI 2011

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

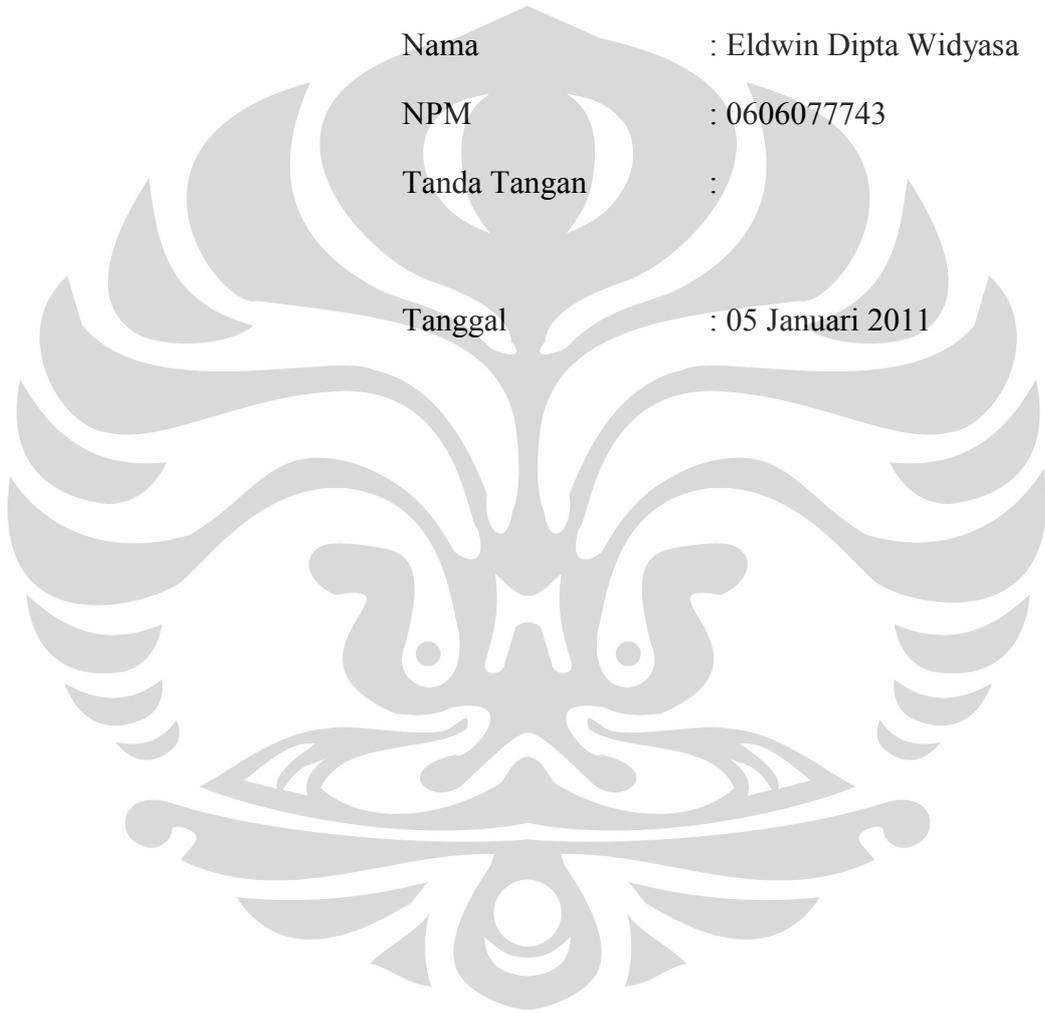
Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Eldwin Dipta Widyasa

NPM : 0606077743

Tanda Tangan :

Tanggal : 05 Januari 2011



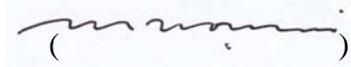
HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Eldwin Dipta Widyasa
NPM : 0606077743
Program Studi : Teknik Perkapalan
Judul Skripsi : Analisa Kurva Aliran Fluida Dengan Menggunakan
Piezoactuator Pelat Datar

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Yanuar, M.Sc, M. Eng ()
Penguji : Ir. Sunaryo, Ph.D ()
Penguji : Ir. Hadi Tresno Wibowo ()
Penguji : Ir. M. A. Talahatu, M.T ()
Penguji : Ir. Mukti Wibowo ()

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT, atas berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi ini tepat waktu. Penulisan skripsi ini dilakukan untuk memenuhi salah satu syarat mencapai gelar Sarjana Teknik Program Studi Teknik Perkapalan pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Yanuar, M.Sc, M. Eng selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini.
2. Dr. Ir. Sunaryo, Ir. M. A. Talahatu, M.T, Ir. Hadi Tresno Wibowo, Ir. Mukti Wibowo selaku dosen pada program studi Teknik Perkapalan yang telah membimbing selama kuliah di Program Studi Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.
3. Papa, Mama, serta Adik yang telah memberikan dukungan baik secara moril maupun materiil sehingga skripsi ini dapat terselesaikan. Semoga dengan terselesaikannya skripsi ini, dapat menjadi penambah semangat bagi papa untuk bisa beraktifitas seperti sedia kala kembali.
4. Raja Humala JR selaku partner dikala susah dan senang dalam menyelesaikan skripsi ini.
5. Teman-teman jurusan Teknik Mesin & Perkapalan, khususnya angkatan 2006 yang telah bersama-sama mengukir kisah perjalanan hidupnya di fakultas Teknik Universitas Indonesia.
6. Para sahabat, teman dekat dan pihak-pihak yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu.

Akhir kata, semoga Allah SWT berkenan membalas kebaikan semua pihak yang telah disebutkan di atas. Semoga skripsi ini membawa manfaat untuk perkembangan ilmu pengetahuan.

Depok, Januari 2011

Eldwin Dipta. W

HALAMAN PERNYATAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR
UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Eldwin Dipta Widyasa

NPM : 0606077743

Program Studi : Teknik Perkapalan

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

**Analisa Kurva Aliran Fluida Dengan Menggunakan
Piezoactuator Pelat Datar**

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak bebas royalti noneksklusif ini, Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalih media/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 : Depok

Pada tanggal : 05 Januari 2011

Yang menyatakan

Eldwin Dipta Widyasa

Abstrak

Kekentalan fluida, jenis fluida, kecepatan alir adalah komponen yang mempengaruhi pemakaian energi. Sistem aliran pada mesin atau kapal sangat kompleks dan banyak jenis fluida yang digunakan. Tujuan penelitian kami adalah mengetahui karakteristik fluida (rheological) dimana saat mengalir akan mengalami gaya penarikan dan penekanan. Jenis Viskometer yang digunakan harus sesuai dengan kekentalan fluida uji. Piezoactuator viskometer dengan pelat datar dan pelat miring dapat digunakan untuk membuat kurva aliran hubungan antara shear stress dengan shear rate. Oil, grease, crude oil, dan pasta gigi digunakan dalam percobaan kali ini. Penambahan jarak antar pelat serta kemiringan sudut menunjukkan grafik dengan jelas dimana fluida-fluida tersebut akan mengalami variasi nilai shear stress dan nilai strain rate yang diikuti pula dengan perubahan viskositas fluida.

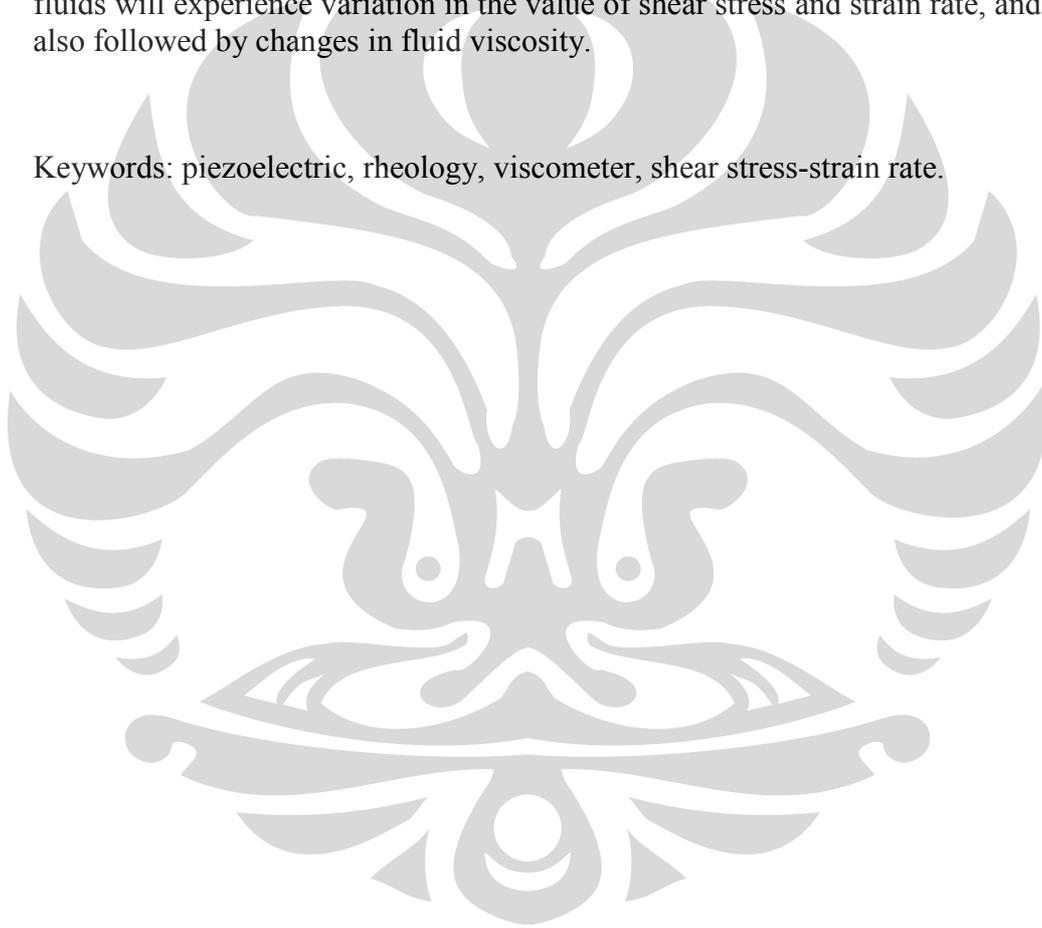
Kata kunci : piezoelectric, rheologi, viscometer, shear stress-strain rate.



Absract

Fluid viscosity, fluid type, and flow rate are teh components that effect energy consumption. Flow system on a mechine or vessel is very complex and many types of fluid used. The purpose of our experiment was to determine the characteristics of the fluid (Rheology) where the current flows will experience withdrawal style and emphasis. Type of viscometer used must be in accordance with the test fluid viscosity. Piezoactuator viscometer with flat and sloping plate can be used to make the flow curve relationship between shear stress and shear rate. Oil, grease, crude oil and toothpaste are used in our experiment this time. The addition of gap distance between two parallel plates and slope angle clearly shows where the fluids will experience variation in the value of shear stress and strain rate, and it is also followed by changes in fluid viscosity.

Keywords: piezoelectric, rheology, viscometer, shear stress-strain rate.



DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	i
PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	iv
ABSTRAK	v
ABSTRAC	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metodologi Penelitian	3
1.6 Sitematika Penulisan	4
BAB II LANDASAN TEORI	
2.1 Fluida ElectroRheological	6
2.2 Piezo-electricity	8
2.3 Squeeze Flow	9
BAB III RANCANGAN ALAT	
3.1 Spesifikasi Kompenen	11
3.2 Detail Rancangan Alat	13
3.3 Langkah Piezoactuator Setting	14

BAB IV METODE PENGAMBILAN DATA DAN ANALISA

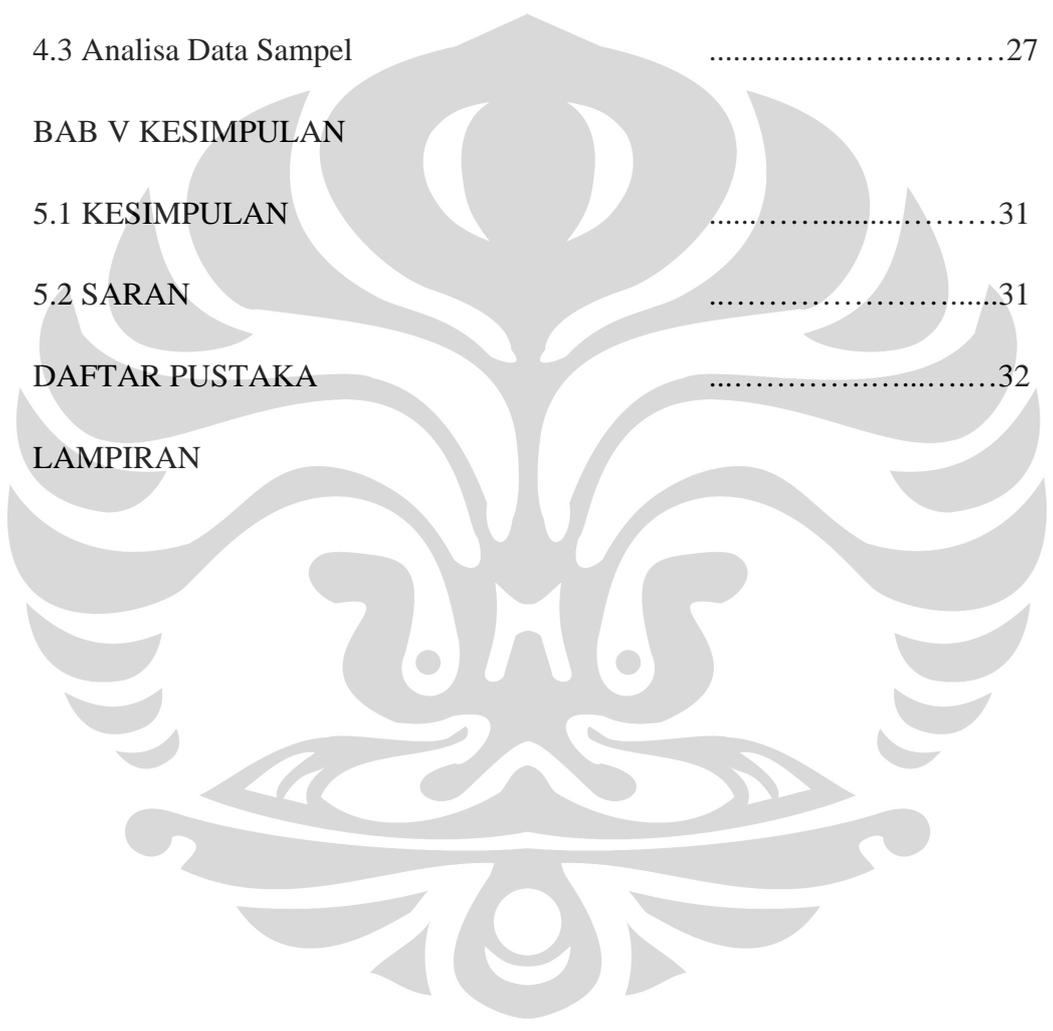
4.1 Proses Pengambilan Data16
4.2 Pengolahan Data24
4.3 Analisa Data Sampel27

BAB V KESIMPULAN

5.1 KESIMPULAN31
5.2 SARAN31

DAFTAR PUSTAKA32
----------------	---------

LAMPIRAN



DAFTAR GAMBAR

- 1) Gambar 1.1 Posisi Fluida Pada Pelat Datar
- 2) Gambar 1.2 Eksperiment Dengan Pengatur Jarak Antar Pelat
- 3) Gambar 2.1 Karakteristik Fluida
- 4) Gambar 2.2 Ilustrasi Instalasi Piezo-actuator
- 5) Gambar 2.3 Ilustrasi Peletakan Fluida Sampel
- 6) Gambar 2.4 Aplikasi Sudut Pada Fluida Sampel
- 7) Gambar 3.1 Piezo-actuator
- 8) Gambar 3.2 Load Cell
- 9) Gambar 3.3 Laser OMRON ZX-Series
- 10) Gambar 3.4 Pelat Dengan Berbagai Sudut
- 11) Gambar 3.5 Amplifier
- 12) Gambar 3.6 Acctuator
- 13) Gambar 3.7 Interface
- 14) Gambar 3.8 PC
- 15) Gambar 3.9 Pemasangan Piezo-actuator
- 16) Gambar 3.10 Skema Instalasi Alat Eksperiment
- 17) Gambar 3.11 Pemasangan Kabel Pada Interface
- 18) Gambar 3.12 Pemasangan Kabel Pada Piezo-actuator
- 19) Gambar 3.13 Pemasangan Kabel antara Piezo-actuator Dengan Drive-actuator
- 20) Gambar 4.1 Setting Software
- 21) Gambar 4.2 Setting Software
- 22) Gambar 4.3 Setting Software
- 23) Gambar 4.4 Setting Software
- 24) Gambar 4.5 Setting Software
- 25) Gambar 4.6 Setting Software
- 26) Gambar 4.7 Setting Software
- 27) Gambar 4.8 Setting Software
- 28) Gambar 4.9 Setting Software

- 29) Gambar 4.10 Setting Software
- 30) Gambar 4.11 Setting Software
- 31) Gambar 4.12 Setting Software
- 32) Gambar 4.13 Setting Software
- 33) Gambar 4.14 Setting Software
- 34) Gambar 4.15 Setting Software
- 35) Gambar 4.16 Setting Software
- 36) Gambar 4.17 Hasil Data Yang Diperoleh
- 37) Gambar 4.18 Grafik 1000 Hz Fluida Sampel
- 38) Gambar 4.19 Grafik Gap-Shear Stress Fluida Sampel Pada 2000 Hz
- 39) Gambar 4.20 Grafik Shear Stress-Strain Rate Crude Oil
- 40) Gambar 4.21 Grafik Shear Stress-Strain Rate Grease Type A
- 41) Gambar 4.22 Grafik Shear Stress-Strain Rate Grease Type B
- 42) Gambar 4.20 Grafik Shear Stress-Strain Rate Oil
- 43) Gambar 4.20 Grafik Shear Stress-Strain Rate Pasta Gigi

BAB I

PENDAHULUAN

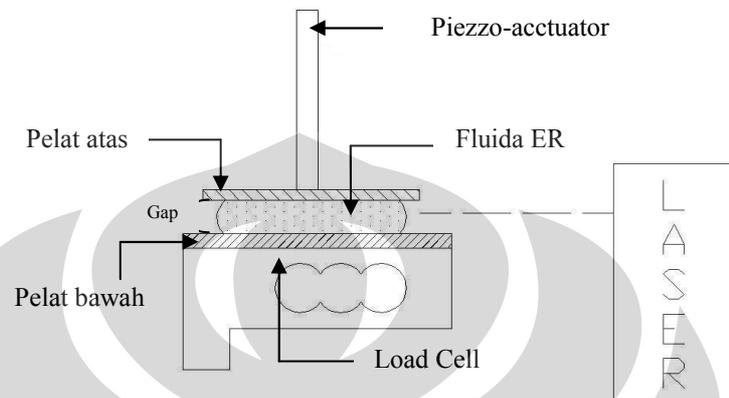
1.1 Latar Belakang

Krisis energi yang melanda dunia belakangan ini menjadi tren hangat yang sering dibicarakan semua orang. Penelitian-penelitian mengenai penghematan energi dan energi yang dapat diperbarui terus dilakukan guna mengatasi krisis energi tersebut. Hal ini juga merambah masuk dan mempengaruhi pemakaian energi dalam dunia perkapalan. Banyak sistem dalam kapal yang berjalan secara terus menerus yang akan membutuhkan banyak energi, seperti sistem sirkulasi minyak atau *grease*, sehingga penghematan pemakaian energi termasuk salah satu aspek yang sangat penting. Oleh karena itu, menarik untuk diteliti mengenai sifat-sifat karakteristik fluida dalam sistem pelumasan tersebut.

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk mengetahui karakter aliran suatu fluida dan energi yang dibutuhkan untuk mengalirkannya adalah dengan cara mengetahui nilai kekentalan fluida tersebut dimana bukan hanya karena dipengaruhi oleh suhu tetapi juga dikarenakan pengaruh dari kecepatan aliran fluida tersebut.

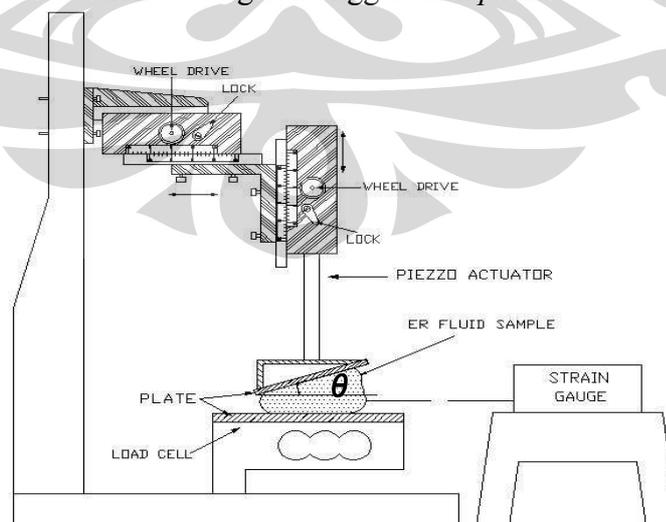
Untuk mengetahui kekentalan fluida cair, seperti air, bensin, minyak tanah, sering digunakan Viskometer pipa kapiler. Sedangkan untuk fluida yang memiliki kekentalan 20x dari air digunakan Rotary coaxial viscometer yang jenisnya beragam. Pada penelitian Tugas Akhir yang kami lakukan, kami melihat karakter fluida tersebut dengan bantuan alat *piezzo-actuator* dimana yang menarik dalam alat yang kami gunakan adalah pemberian tekanan yang sangat kecil pada fluida sampel (berupa getaran, sehingga cocok untuk pelumasan). *Piezzo actuator* ini bukan merupakan barang baru di dunia rheologi, tetapi belum banyak diteliti di Indonesia. Dalam beberapa jurnal yang telah penulis baca sebagai bahan literatur, umumnya alat ini diletakkan secara vertikal diatas sebuah pelat datar dimana pelat datar ini akan menyentuh fluida sampel yang akan diuji diatas sebuah pelat lain

yang terkoneksi dengan *load cell* [gambar 1]. Fluida sample akan mengalir dengan lambat dimana nilai $Re < 1$, atau dikenal dengan nama *quete flow*.



Gambar 1.1

Berdasarkan gambar di atas, penulis mencoba sedikit memodifikasi perlakuan yang diberikan terhadap fluida *electro-rheologi*. Kali ini penulis mencoba untuk menerapkan sudut (θ) di antara kedua buah plat paralel [gambar 1.2], dimana sudut yang coba penulis terapkan sebesar: 5° , 10° , 15° , dan 20° . Penulis pun mencoba beberapa fluida non-newtonian sebagai sample, Crude Oil, Grease type A, Grease type B, Oil dan Pasta Gigi, guna mencoba mengeluarkan grafik fungsi stress-strain rate dengan menggunakan *piezzo-acctuator*.



Gambar 1.2

1.2 Rumusan Masalah

Masih ramainya diperbincangkan mengenai kurva stress-strain rate yang dapat terbentuk dari berbagai macam fluida *electro-rheologi* dengan bantuan *piezzo actuator*. Oleh karena itu, penulisan Tugas Akhir ini diharapkan dapat membantu menjawab penggunaan *piezzo-actuator* dalam dunia *rheologi* khususnya dalam dunia perkapalan.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penulisan Tugas Akhir ini adalah :

1. Memunculkan grafik shear stress-strain rate beberapa macam fluida non-newtonian.
2. Mengetahui pengaruh jarak antar pelat terhadap shear stress-strain rate fluida sampel.
3. Mengetahui pengaruh sudut antar pelat terhadap shear stress-strain rate fluida sampel.

1.4 Batasan Masalah

Penyusunan Tugas Akhir ini dibatasi oleh hal-hal berikut:

1. Penggunaan pelat datar dengan beragam jarak antar kedua pelat
2. Penelitian ini membandingkan shear stress-strain rate fluida sampel terhadap jarak antar pelat.

1.5 Metodologi Penelitian

Penyusunan Tugas Akhir ini menggunakan metodologi penulisan sebagai berikut:

1. Studi Literatur
Sumber yang digunakan berupa jurnal, buku, artikel.
2. Perancangan Alat
Melakukan proses perakitan alat sesuai dengan petunjuk yang ada sehingga dapat bekerja sesuai dengan yang diinginkan.

3. Proses Uji Coba

Menguji kinerja alat percobaan, termasuk modifikasi dan kalibrasi, sehingga dapat diperoleh data yang sesuai dengan harapan.

4. Pengambilan dan Pengolahan Data

Melakukan percobaan dengan *piezzo-acctuator*. Data yang diperoleh masih mentah dan masih harus diolah dengan rumus-rumus tertentu agar mendapat grafik stress-strain rate yang diinginkan.

5. Penyusunan Laporan

Semua data dan literatur dirangkum dalam satu bentuk laporan hasil penelitian.

1.6 Sistematika Penulisan

Penyusunan Tugas Akhir ini menggunakan sistematika penulisan sebagai berikut :

BAB I PENDAHULUAN

Bab 1 menjelaskan tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan, batasan masalah, metodologi penulisan dan sistematika penulisan.

BAB II LANDASAN TEORI

Bab 2 menjelaskan tentang konsep yang menjadi dasar dari penelitian menggunakan metode *squeeze flow* dengan bantuan *piezzo-acctuator*.

BAB III RANCANGAN ALAT

Bab 3 menjelaskan tentang proses perakitan alat *Piezzo-acctuator* serta cara kerja alat tersebut.

BAB IV METODE PENGAMBILAN DATA DAN ANALISA

Bab 4 menjelaskan tentang prosedur pengambilan data dan pengolahan data dari alat dan analisa kinerja alat beserta hasilnya.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab 5 menjelaskan tentang kesimpulan yang didapat dari pembuatan alat serta saran yang berguna untuk kelangsungan penelitian berikutnya.



BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Fluida Electro-rheological

Penulis menggunakan fluida *electro-rheological* sebagai fluida sample. Fluida *electro-rheological* (ER), atau dikenal juga dengan sebutan “*smart-fluid*”, telah dipelajari secara luas untuk kegunaannya pada aplikasi dalam bidang industri, seperti *fast acting hydraulic valves*, *ER brakes*, damper, step actuator, dan lain-lain [1]. Hal ini dikarenakan oleh nilai yield stress yang dimanfaatkan oleh sebagian besar aplikasi. Bagaimana pun juga, laporan tentang shear yield stress dari fluida *electro-rheological* sering kali lebih rendah dari 10 kPa dan tidak cukup tinggi untuk dimanfaatkan pada skala aplikasi. Untuk merancang *electro-rheological* aktuator dengan kemampuan gaya, kekuatan tarik dan tekanan yang lebih tinggi telah diselidiki akhir-akhir ini. Kekuatan tarik dan kekuatan tekan telah diketahui lebih tinggi dari shear yield stress [2]. Monkman telah menyelidiki efek fluida *electro-rheological* dibawah tekanan [3]. Vieira *et al* telah menguji coba tekanan kompresi, tensile yang berhubungan dengan ER fluid yang dipengaruhi oleh partikel karbon dan *silicon oil* [4]. Gong dan lim telah melakukan percobaan terkait dengan tensile dan kompresi dari kandungan ER fluid yang ditambahkan dengan fiber glass [5]. Lee dan pekerjanya telah mempelajari suspensi ER yang dibuat dari partikel silica dan silikon oil dibawah *squeeze-flow* dengan merubah medan elektrik yang ada, kepekatan dari *host oil* dan partikel air terkandung [6]. Noresson dan ohlson telah melaporkan studi mendalam mengenai model bingham dalam mode *squeeze-flow*, yang menunjukkan bahwa ketergantungan amplitudo dan frekuensi tidak diprediksi dengan baik melalui model bingham [7]. Dewasa ini kita telah membandingkan perilaku tekanan, *elongation* dan *shearing*, dari fluida ER, dan telah mempelajari kompresi bertahap dari fluida ER pada voltase konstan yang berbeda-beda.

2.1.1 Jenis Fluida Electro-rheological

Terdapat 2 jenis utama dari fluida *electro-rheological*, yaitu:

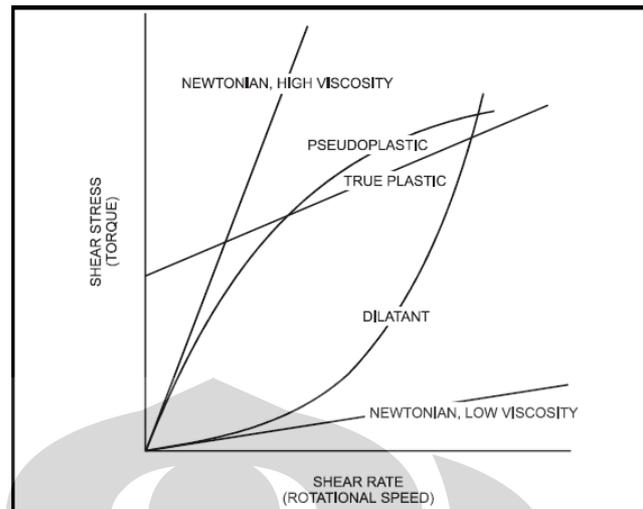
1. Homogen.

Untuk jenis homogen, fluida *electro-rheological* jenis ini merupakan suatu fluida tanpa partikel terdispersi di dalamnya dimana akan merespon secara mekanis bila diberikan medan listrik. Fluida jenis ini juga memiliki potensi besar dalam penggunaannya pada alat-alat mekanis yang sangat kecil, atau dikenal dengan mesin mikro.

2. Berpartikel.

Pada dasarnya terdispersi partikel semi-conductor berukuran mikro yang terisolasi dalam cairan pembawa. Fluida *electro-rheological* jenis ini bila diberikan medan listrik akan mengakibatkan partikel-partikel di dalamnya mempolarisasikan medan listrik dan hasil dari interaksi tersebut akan mengakibatkan peningkatan kadar *viscous* suatu fluida [8-9].

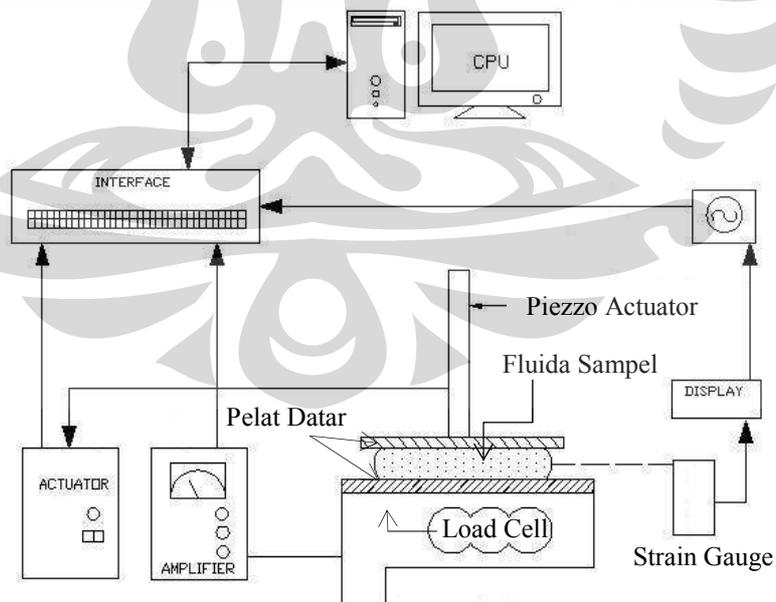
Sebagai tambahan, jenis fluida *electro-rheological* berpartikel menunjukkan efek ER yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan jenis lainnya, tetapi terdapat kesulitan dalam mengaplikasikan jenis fluida ke dalam alat-alat mikro dikarenakan tingginya kekentalan fluida tersebut [10]. Grafik standar shear stress-strain rate berbagai macam fluida dapat pada grafik berikut



Gambar 2.1 Karakterisasi Fluida

2.2 Piezoelectricity

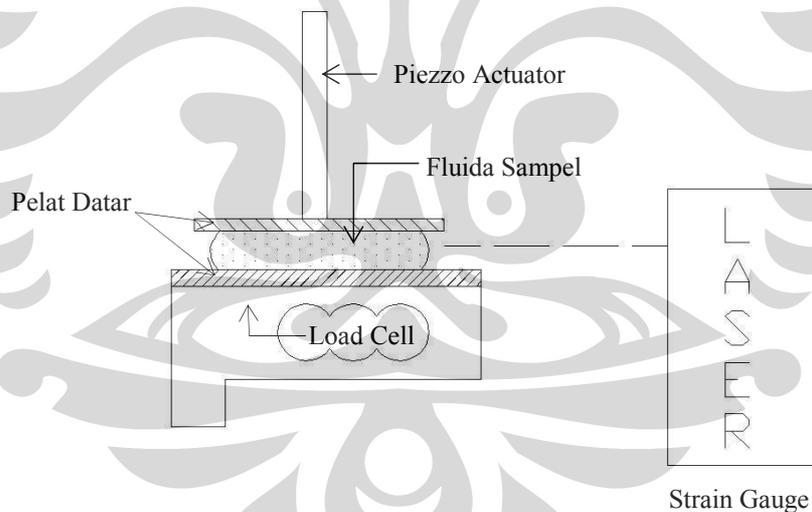
Merupakan suatu kemampuan pada beberapa material, seperti kristal, keramik, dan beberapa protein, untuk menghasilkan medan listrik yang kemudian direspon untuk menjadi mekanikal stress [11]. Piezzo-aktuator dengan pengontrol getaran menggunakan amplifier digunakan oleh penulis untuk menghasilkan *squeeze flow* pada fluida sample (gambar 2.1).



Gambar 2.2 Ilustrasi Instalasi Piezzo-Actuator

2.3 Squeeze Flow

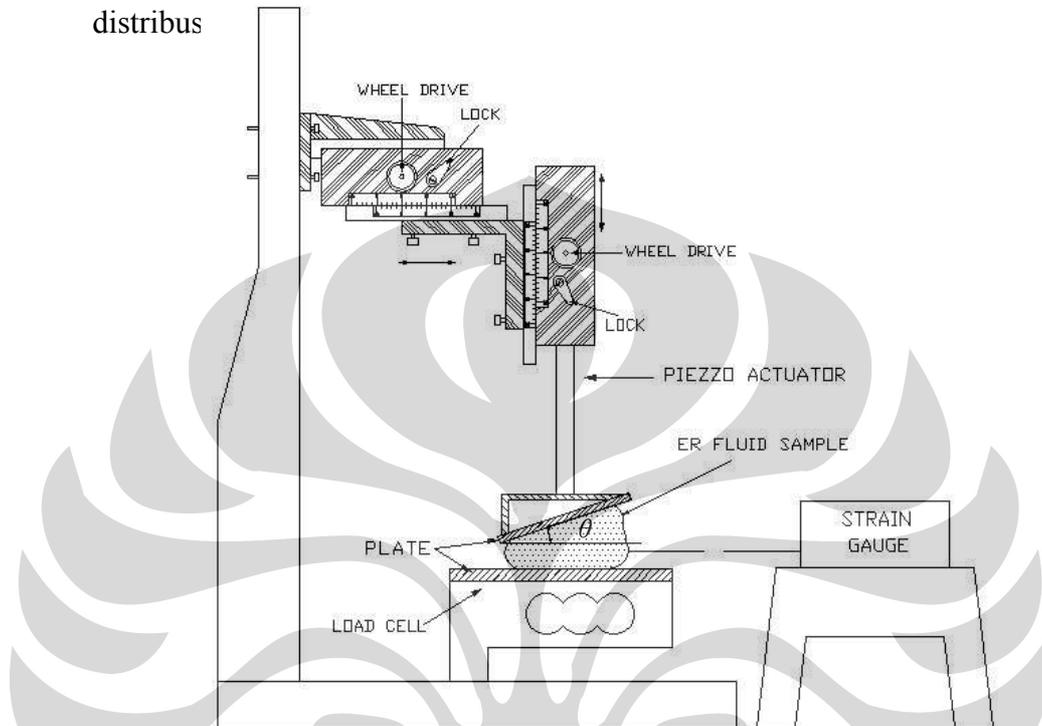
Ketika sebuah fluida diletakkan diantara dua buah plat paralel dan mulai digetarkan, maka akan timbul *Biaxial extensional flow* pada fluida sample tersebut. Inilah yang dinamakan sebagai *squeeze flow* [12]. “*squeeze flow*” yaitu, aliran yang terjadi pada fluida saat fluida tersebut ditekan atau digetarkan diantara 2 buah plat paralel (gambar 2.2) [13]. Ketika gaya yang diberikan dari salah satu pelat dapat dihitung bersama dengan jarak yang terdapat diantara kedua pelat tersebut, maka dapat menghasilkan nilai *biaxial Strain rate*. *Squeeze flow* sering ditemukan dalam dunia teknik, biologi dan *rheometer*. Beberapa fenomena yang terjadi di sekeliling kita seperti mengunyah makanan, tertekannya makanan antara lidah dan langit-langit mulut, dan juga menekan makanan diantara jari tangan dapat dikategorikan sebagai *squeeze flow* [14-17].



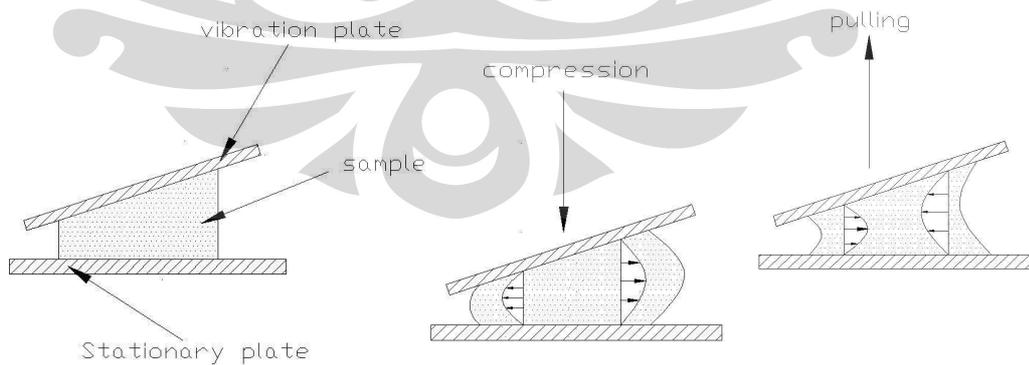
Gambar 2.3 Ilustrasi Penempatan Fluida Sample

Squeeze flow merupakan sebuah teknik yang menarik untuk mengukur *rheological properties* dari sebuah material yang memiliki kesukaran dalam pengukurannya menggunakan rheometer konvensional, sebagai contoh: material yang terlalu pekat, serta material yang mengandung partikel-partikel besar [18].

Dalam penelitian untuk Tugas Akhir kali ini, penulis mencoba suatu inovasi pada fluida sample yaitu menerapkan sudut θ pada plat datar yang terhubung dengan *piezzo-actuator* (Gambar 2.3). Pengaplikasian sudut θ pada fluida sampel memiliki karakteristik distribusi aliran yang berbeda dengan distribus



Gambar 2.3 Aplikasi Sudut pada fluida sampel



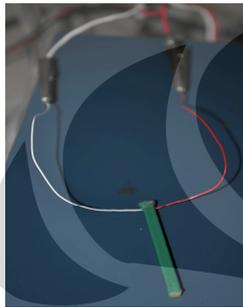
Gambar 2.4 Perbandingan Distribusi Kecepatan Fluida Dalam Pipa Dengan Diantara 2 Pelat Paralel

BAB III

RANCANGAN ALAT

3.1 Spesifikasi Komponen

- a. Piezoactuator, berfungsi untuk merubah energi listrik menjadi energi mekanis, sebagai media yang memberikan gaya pada fluida yang akan diuji.



Gambar 3.1

- b. Load cell, berfungsi sebagai sensor pengukur stress yang diterima oleh fluida sample



Gambar 3.2

- c. Lasser Omron ZX-series, berfungsi sebagai sensor pengukur regangan fluida sample



Gambar 3.3

d. Pelat, berfungsi sebagai tempat diletakkan fluida yang akan diuji

e. Amplifier, berfungsi untuk menyalurkan hasil data yang diperoleh dari load cell untuk diteruskan ke interface untuk kemudian diterjemahkan oleh CPU.



Gambar 3.5

f. Actuator, berfungsi untuk menyalurkan perintah dari CPU untuk menggetarkan piezoactuator.



Gambar 3.6

g. Interface, berfungsi untuk menterjemahkan hasil data yang didapat ke dalam computer.

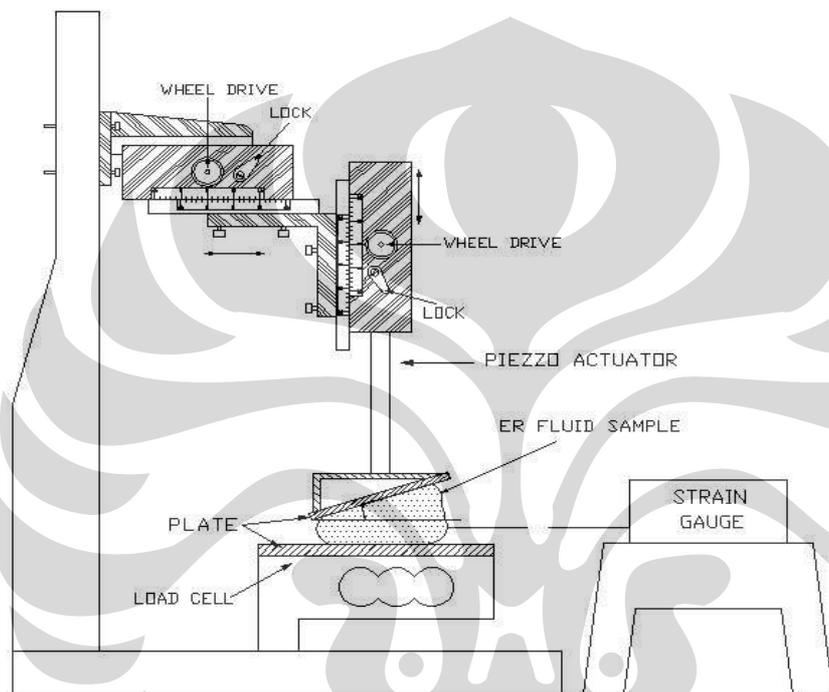


Gambar 3.7

- h. CPU, berfungsi untuk mengatur pengambilan data dan mengolah data yang telah diperoleh

3.2 Detail Rancangan alat

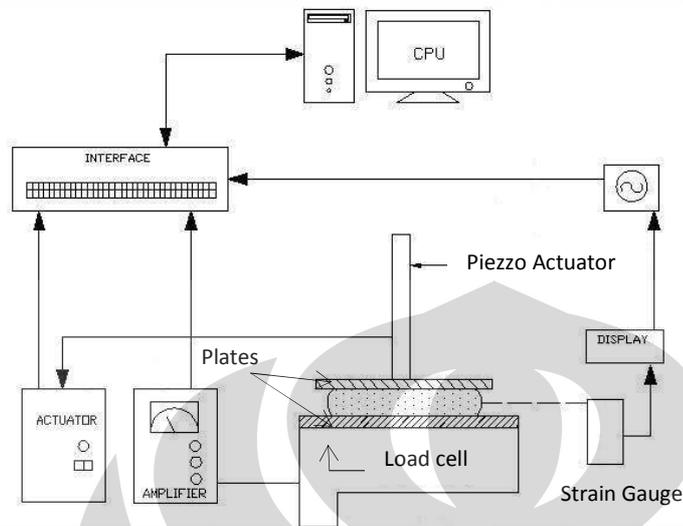
1. Rancangan pemasangan piezoactuator



Gambar 3.9

Pada rancangan ini pengukuran sangat diperhatikan pada posisi antar kedua pelat dan laser untuk melihat regangan pada fluida. Posisi pelat bagian atas dengan fluida harus diperhatikan jarak diantaranya karena dapat berpengaruh pada stress yang diterima oleh fluida sampel.

2. Rancangan alat-alat pengoperasian pengambilan data



Gambar 3.10

3.3 Langkah Piezoactuator setting

Pada penelitian tugas akhir ini, ada 3 proses utama dalam instalasi piezoactuator, yaitu :

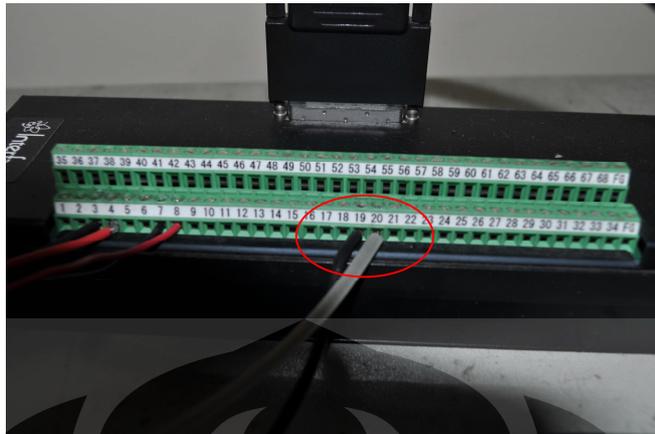
a. Setting Koneksi

1. Masukkan PC AD/DA ke PC Slot. (gambar 1)
2. Cek koneksi kabel pada interface
 - I. Kabel yang menghubungkan piezo dengan interface : kabel putih dihubungkan pada interface no. 20 dan kabel hitam dihubungkan pada interface no. 19.

Keterangan :

- No. 19 Vcom1: ini merupakan voltage common channel I, common voltage dapat pula dikatakan sebagai ground voltage.
- No. 20 Vout1 : ini merupakan voltage out channel 1,

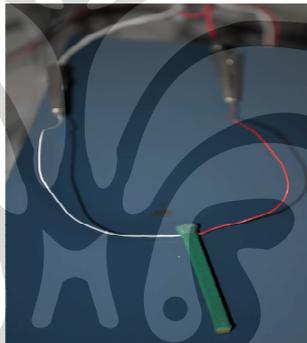
Kedua kabel tersebut dihubungkan pada input pada drive actuator seperti terlihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 3.11

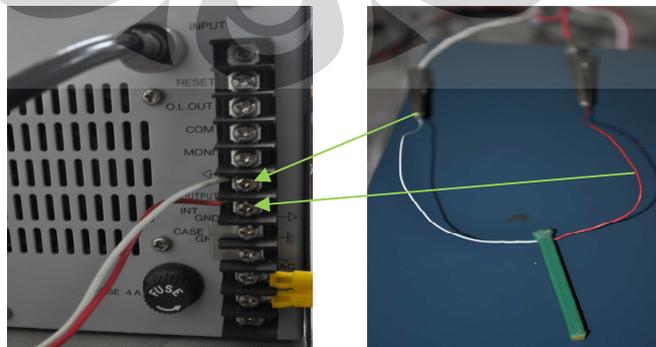
II. Kabel yang menghubungkan antara piezzo dengan drive actuator

- Piezzoatuator dihubungkan oleh kabel putih dan merah seperti terlihat pada gambar dibawah :



Gambar 3.12

- Sedangkan kabel merah dihubungkan dengan output dan putih dihubungkan dengan ground pada drive actuator seperti terlihat pada gambar dibawah :

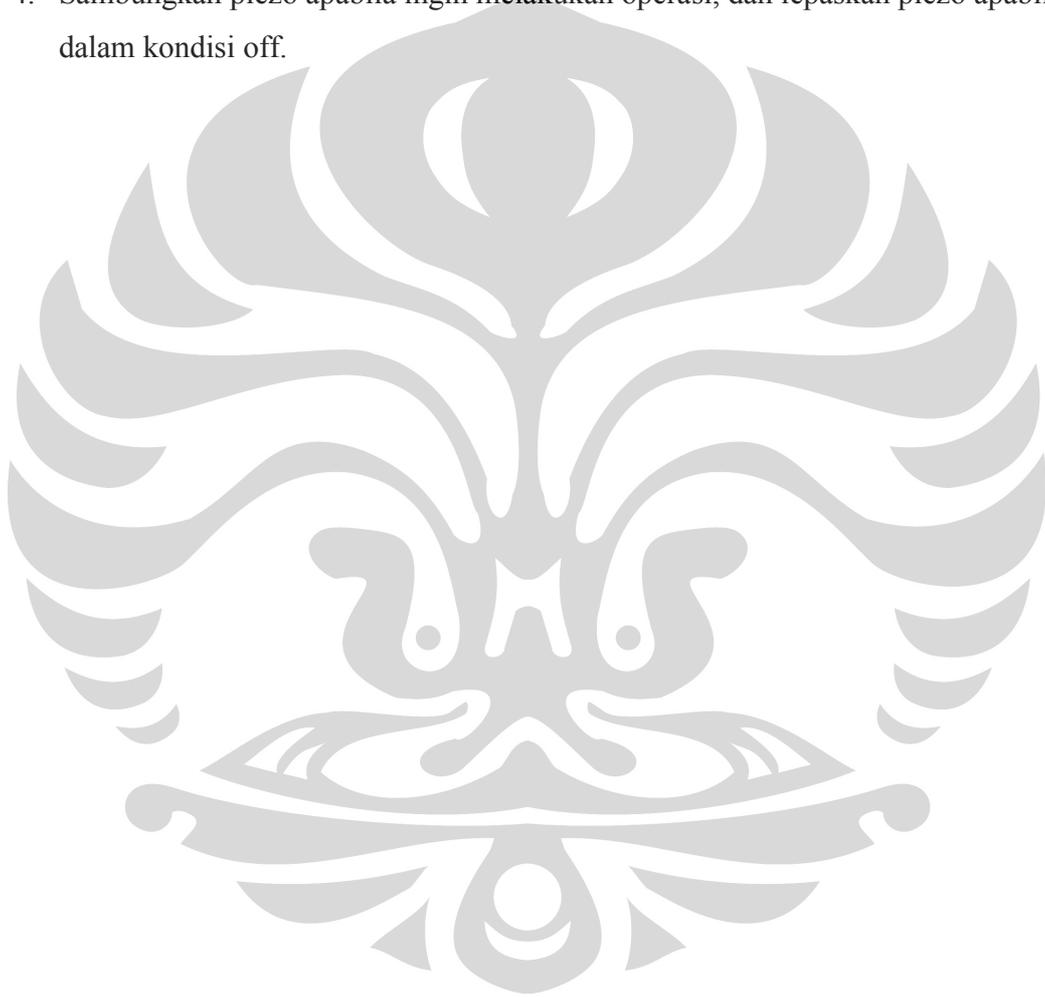


Gambar 3.13

b. Pengoperasian program

Setelah semua kabel telah dikoneksikan dengan benar, tahap selanjutnya adalah proses pengoperasian adapun tahapannya adalah :

1. Buka aplikasi interface GPC-3300 (Digital to analog)
2. Open file
3. Setting
4. Sambungkan piezo apabila ingin melakukan operasi, dan lepaskan piezo apabila dalam kondisi off.



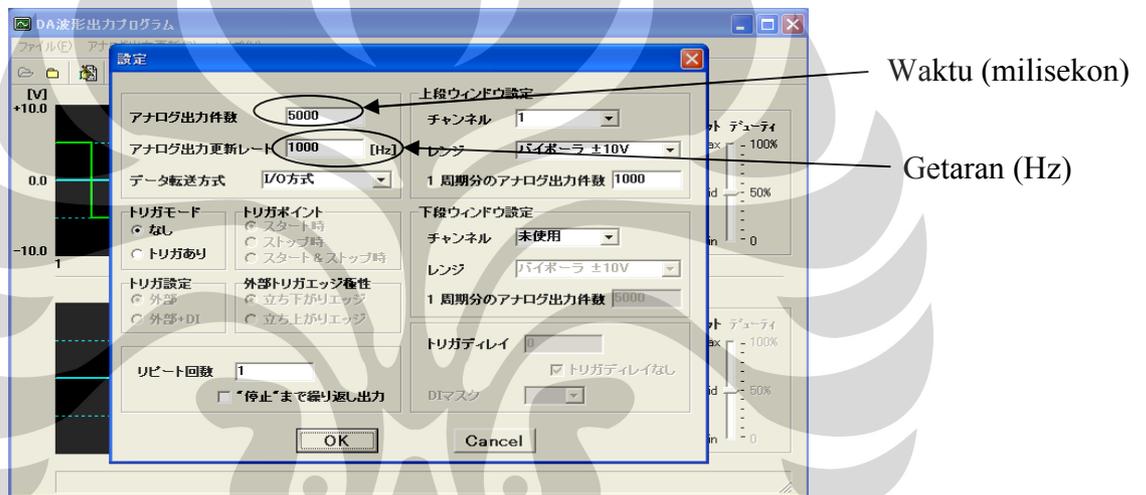
BAB IV METODE PENGAMBILAN DATA DAN ANALISA

4.1 Proses Pengambilan Data

Pada proses pengambilan data, terdapat 4 kali pengambilan data pada tiap sampel dengan peningkatan gaya yang diberikan pada fluida tersebut.

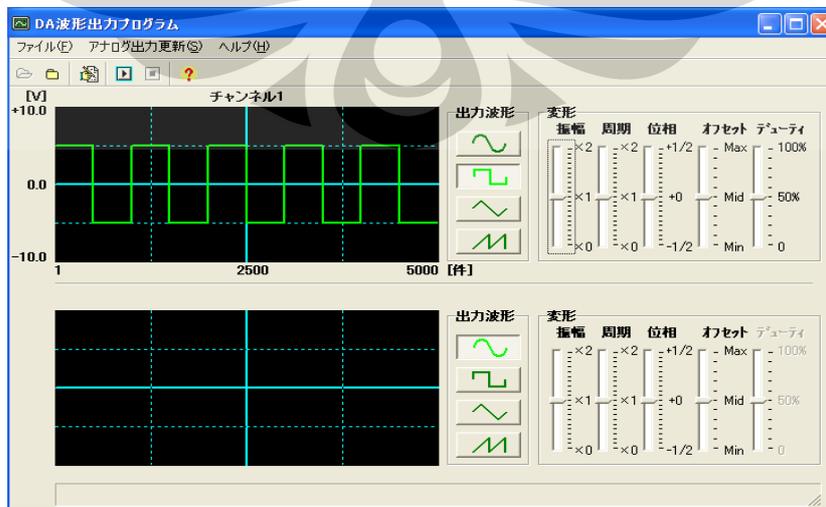
1. Dengan diberi tegangan 1000 Hz

Dilakukan pengambilan dengan cara mengatur pemberian gaya pada aplikasi GPC-3300 Digital to Analog (DA) seperti gambar dibawah ini



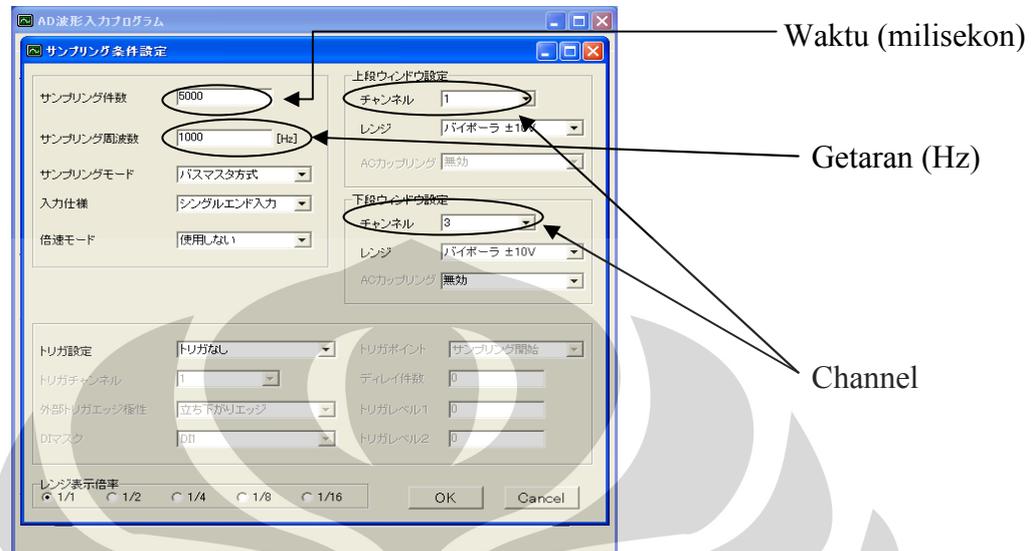
Gambar 4.1

Sehingga akan muncul grafik yang menggambarkan bentuk getaran yang akan diberikan pada fluida sampel uji seperti gambar dibawah ini



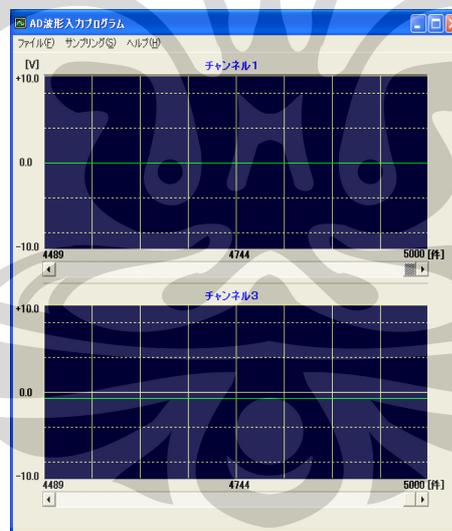
Gambar 4.2

Pada aplikasi Analog to Digital (AD) juga diatur untuk melihat data yang akan diterima dari load cell dan strain gauge sehingga pada AD juga harus di atur terlebih dahulu seperti gambar di bawah ini



Gambar 4.3

Setelah di atur seperti diatas maka, akan di dapat grafik pada AD seperti gambar dibawah ini



Gambar 4.4

Setelah grafik didapat seperti gambar diatas, maka hasilnya dapat diterjemahkan ke dalam bentuk Microsoft Excel.

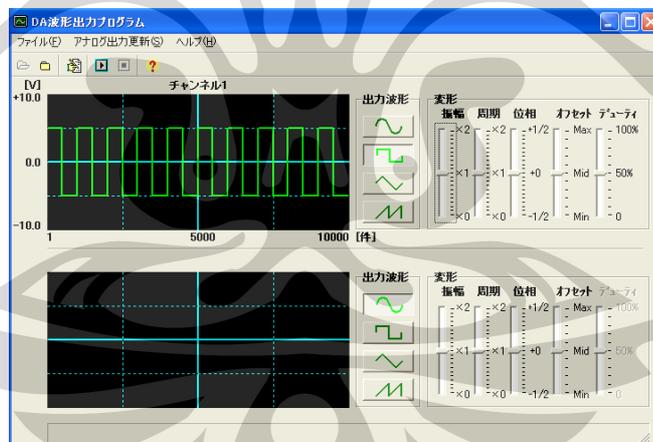
2. Diberi tegangan 2000 Hz

Setelah data pada 1000 Hz didapat maka dilanjutkan dengan tegangan 2000 Hz dengan merubah pengaturan pada gambar dibawah ini



Gambar 4.5

Sehingga pada DA akan membentuk grafik seperti gambar di bawah ini



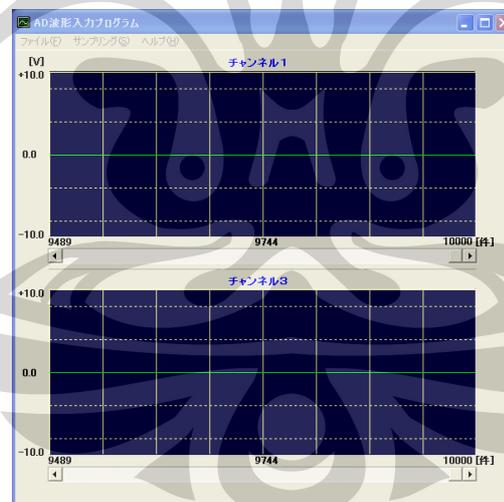
Gambar 4.6

Pada AD juga dilakukan pengaturan seperti gambar dibawah ini :



Gambar 4.7

Setelah pengaturan sesuai dengan gambar-gambar diatas maka proses pengambilan data dapat dilakukan. Sehingga pada aplikasi AD akan menghasilkan grafik seperti dibawah ini :

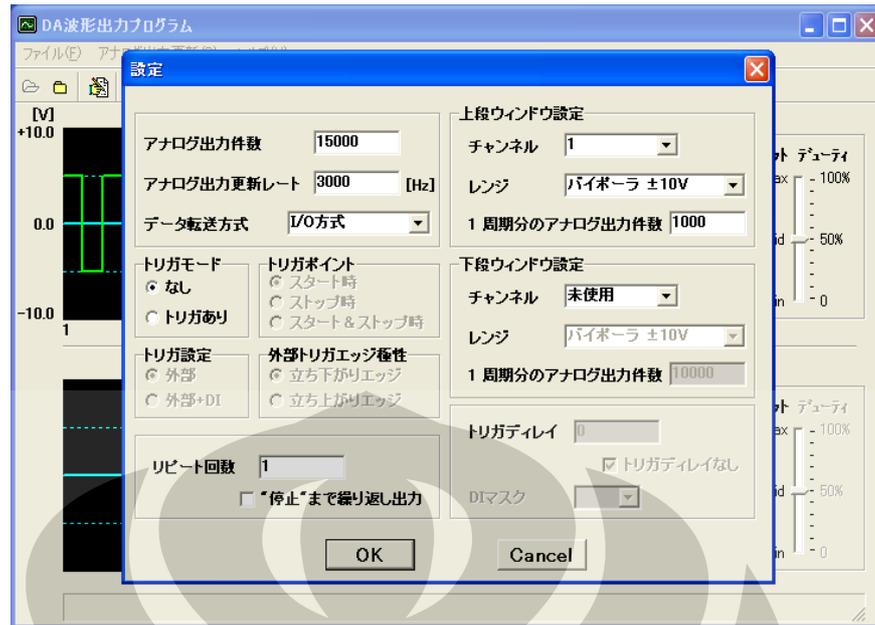


Gambar 4.8

Setelah mendapatkan hasil gradik yang ditandai dengan garis hijau, maka grafik tersebut dapat diterjemahkan ke aplikasi Microsoft excel.

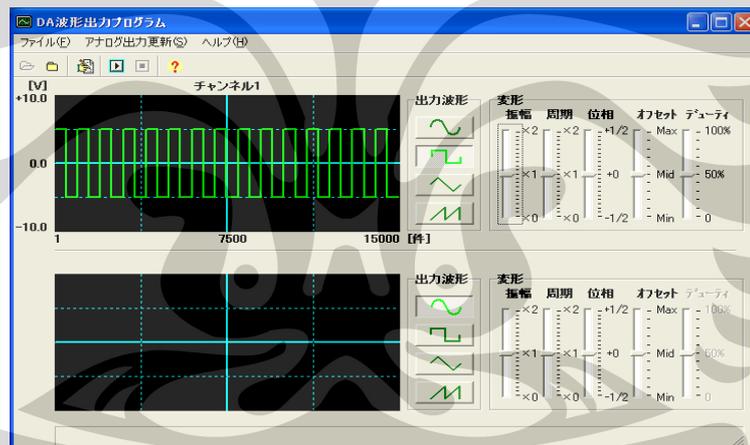
3. Diberi tegangan 3000 Hz

Sepeti cara diatas pengaturan pada aplikasi DA seperti gambar di bawah ini



Gambar 4.9

Sehingga menghasilkan grafik pada aplikasi seperti gambar dibawah ini



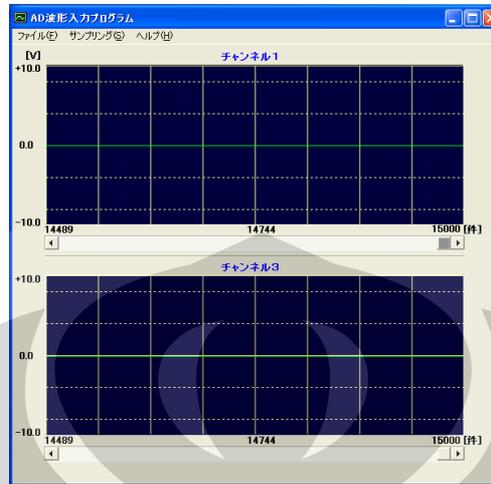
Gambar 4.10

Demikian juga pada aplikasi AD akan diatur seperti gambar dibawah ini



Gambar 4.11

Seperti yang dilakukan sebelumnya maka pada AD akan membentuk grafik seperti gambar dibawah ini

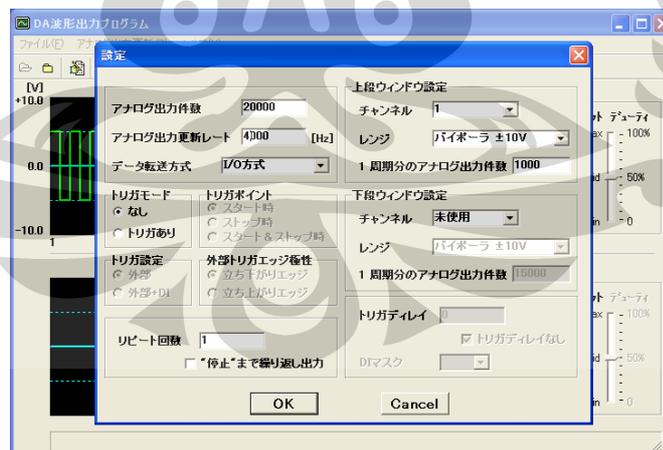


Gambar 4.12

Setelah didapat grafik diatas maka grafik tersebut dapat diterjemahkan ke aplikasi Microsoft Excel.

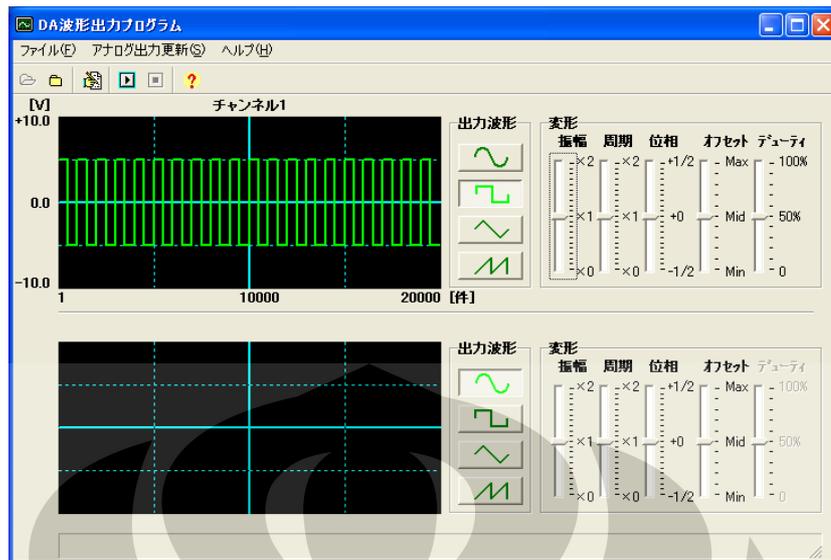
4. Diberi tegangan 4000 Hz

Seperti proses pengaturan diatas maka pada aplikasi DA diatur seperti gambar dibawah ini



Gambar 4.13

Sehingga grafik pada DA akan seperti gambar dibawah ini



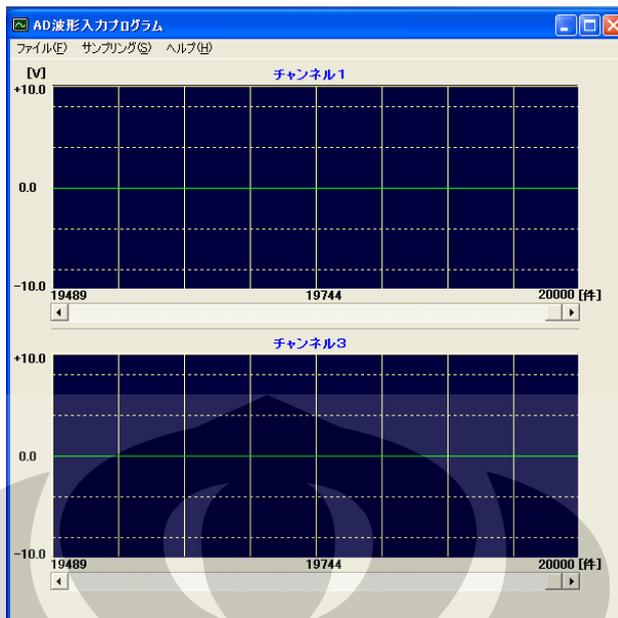
Gambar 4.14

Dan pengaturan pada aplikasi AD seperti gambar di bawah ini



Gambar 4.15

Setelah pengaturan sesuai dengan gambar diatas, maka pengambilan data dapat dilakukan pada sampel uji sehingga AD akan menghasilkan grafik seperti gambar dibawah ini yang dapat dibaca datanya dengan menggunakan Microsoft excel



Gambar 4.16

Proses pengambilan data tersebut kemudian diterapkan pada pelat datar dan pelat dengan memiliki kemiringan yang telah ditentukan (5° , 10° , 15° , 20°).

4.2 Pengolahan Data

Setelah data di dapat dari hasil percobaan, maka akan didapat data seperti gambar dibawah ini. Contoh data sampel pada nilai gap 2 mm dan tegangan 1000 Hz.

Time[sec]	CH01	CH03	Time[sec]	CH01	CH03	Time[sec]	CH01	CH03			
1	0.001	0.0885	0.40192	27	0.026	0.09094	0.40283	4977	4.976	0.09064	0.44891
2	0.002	0.09064	0.40161	28	0.027	0.09125	0.39948	4978	4.977	0.09064	0.44891
3	0.003	0.09155	0.40192	29	0.028	0.08972	0.40314	4979	4.978	0.0882	0.44922
4	0.004	0.09186	0.40405	30	0.029	0.09003	0.40222	4980	4.979	0.09216	0.44922
5	0.005	0.09216	0.40192	31	0.03	0.09064	0.40253	4981	4.98	0.09216	0.44952
6	0.006	0.09186	0.40131	32	0.031	0.09094	0.40253	4982	4.981	0.09186	0.44464
7	0.007	0.09308	0.40131	33	0.032	0.09125	0.40344	4983	4.982	0.09308	0.44983
8	0.008	0.09308	0.39856	34	0.033	0.09186	0.40314	4984	4.983	0.09399	0.44983
9	0.009	0.09003	0.40222	35	0.034	0.09064	0.40375	4985	4.984	0.09338	0.45013
10	0.01	0.09308	0.40283	36	0.035	0.09094	0.40375	4986	4.985	0.0943	0.44952
11	0.011	0.09338	0.40161	37	0.036	0.09064	0.39978	4987	4.986	0.09155	0.44891
12	0.012	0.09399	0.40192	38	0.037	0.08698	0.40344	4988	4.987	0.09338	0.44983
13	0.013	0.09216	0.40314	39	0.038	0.09125	0.40192	4989	4.988	0.09308	0.45013
14	0.014	0.0943	0.40283	40	0.039	0.08942	0.40283	4990	4.989	0.09399	0.45074
15	0.015	0.09369	0.40253	41	0.04	0.08972	0.40161	4991	4.99	0.09277	0.45013
16	0.016	0.09277	0.40314	42	0.041	0.08942	0.39856	4992	4.991	0.09216	0.45044
17	0.017	0.09308	0.40161	43	0.042	0.0885	0.40222	4993	4.992	0.09338	0.45166
18	0.018	0.09247	0.40344	44	0.043	0.0885	0.40283	4994	4.993	0.09277	0.45074
19	0.019	0.09186	0.40253	45	0.044	0.08789	0.4007	4995	4.994	0.09308	0.45166
20	0.02	0.09216	0.40222	46	0.045	0.08698	0.4007	4996	4.995	0.09247	0.44922
21	0.021	0.09125	0.40497	47	0.046	0.0882	0.40222	4997	4.996	0.09155	0.45105
22	0.022	0.09125	0.40466	48	0.047	0.08728	0.401	4998	4.997	0.09125	0.44891
23	0.023	0.09247	0.40344	49	0.048	0.08575	0.40161	4999	4.998	0.09094	0.45013
24	0.024	0.09125	0.40314	50	0.049	0.08606	0.401	5000	4.999	0.09186	0.45044
25	0.025	0.09064	0.40283	51	0.05	0.08575	0.39917	5001	5	0.09064	0.45136
26				52	0.051	0.08636	0.40161	5002			

Gambar 4.17 Contoh data mentah yang diperoleh dalam penelitian

Sehingga setelah didapat data seperti gambar diatas maka CH03 pada table (C2 sampai dengan C5001) di kalibrasikan untuk mendapatkan perubahan jarak yang sesungguhnya yang didapat dari Strain Gauge. Nilai CH03 tersebut dibagi dengan 2,04 sehingga perubahan jarak sesungguhnya didapat ($H(t)$).

Setelah pengolahan tersebut dilakukan, maka dicari inisial jarak untuk mencari H_0 dengan menghitung :

$$H_0 = (D_{akhir} - D_{awal}) + D_{mula-mula}$$

Dimana D_{awal} adalah jarak awal sesaat sebelum fluida mulai digetarkan dan D_{akhir} adalah jarak akhir setelah fluida digetarkan. Setelah itu, semua nilai rata-rata dari $H(t)$ yang didapat dibagi dengan nilai H_0 yang diperoleh, sehingga nilai yang didapat digunakan untuk mencari nilai e dimana nilai e diperoleh dari persamaan Henky-Strain :

$$e = -\ln \frac{H(t)}{H_0}$$

Setelah nilai e diperoleh, maka kita beralih ke pada CH01 (kolom B2 sampai dengan B5001). Data pada CH01 atau channel 1 pada interface didapat dari detector pendeteksi gaya, dimana gaya maksimum dapat sebesar 0,5884 N/kV.

Data pada kolom B kemudian dicari rata-ratanya untuk mendapatkan nilai rata-rata gaya yang diperoleh sebesar 0,089897 . setelah itu nilai rata-rata yang didapat maka nilai tersebut dikalikan dengan 0,5884 N/kv untuk mendapatkan nilai F . setelah nilai F didapat, kemudian dikonversi ke dalam format true-stress Hengky strain sesuai dengan persamaan berikut :

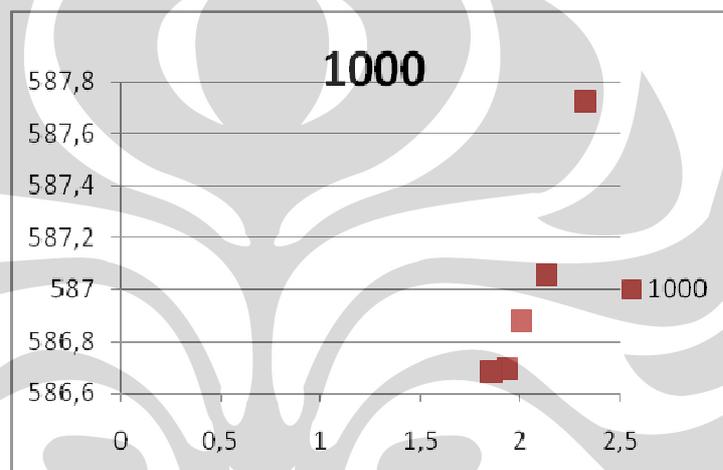
$$\tau = \frac{F(t)}{A}$$

Dimana:

$F(t)$ adalah gaya saat waktu t

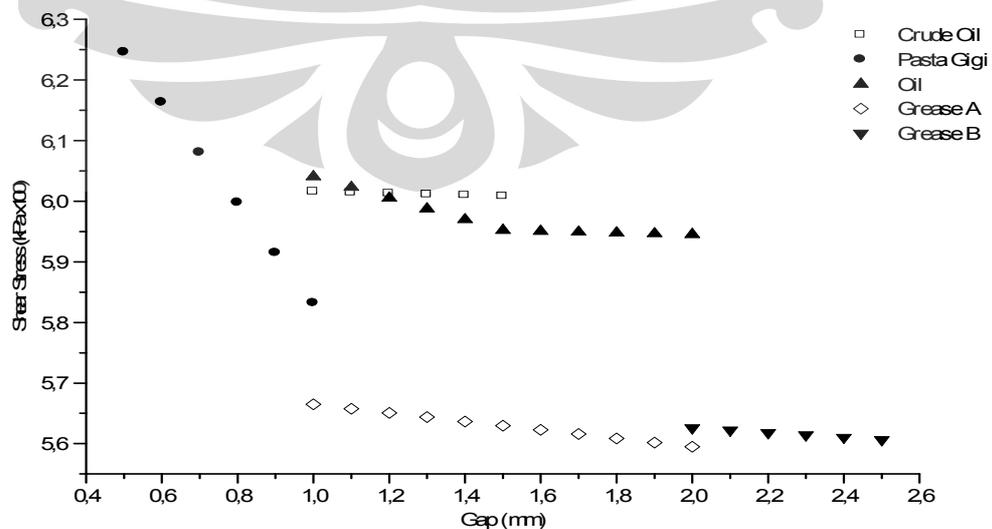
A adalah luas area sampel uji

Dalam setiap pengambilan data, sampel uji diberikan 4 tegangan yaitu 1000 Hz, 2000 Hz, 3000 Hz, 4000 Hz. Setiap tegangan yang diberikan, diambil 5 data sehingga untuk keempat data yang lain diperlakukan sama dengan data pertama, tetapi nilai pada kolom C atau nilai dari strain gauge yang telah diolah menjadi nilai H harus dikalibrasi dengan nilai H_{awal} pada perhitungan data pertama yang telah diolah tadi sehingga H_{awal} untuk semua data sama. Hal ini dilakukan supaya grafik yang didapat lebih terlihat perubahannya, sehingga grafik pada tegangan 1000 Hz akan memperlihatkan seperti gambar dibawah ini.



Gambar 4.18 Contoh grafik 1000 Hz setelah diolah

Untuk perhitungan data pada 2000 Hz, 3000 Hz dan 4000 Hz diperlakukan sama dengan perhitungan pada tegangan 1000 Hz sehingga data pada gap 2 mm dari sampel tersebut akan membentuk grafik seperti dibawah ini.



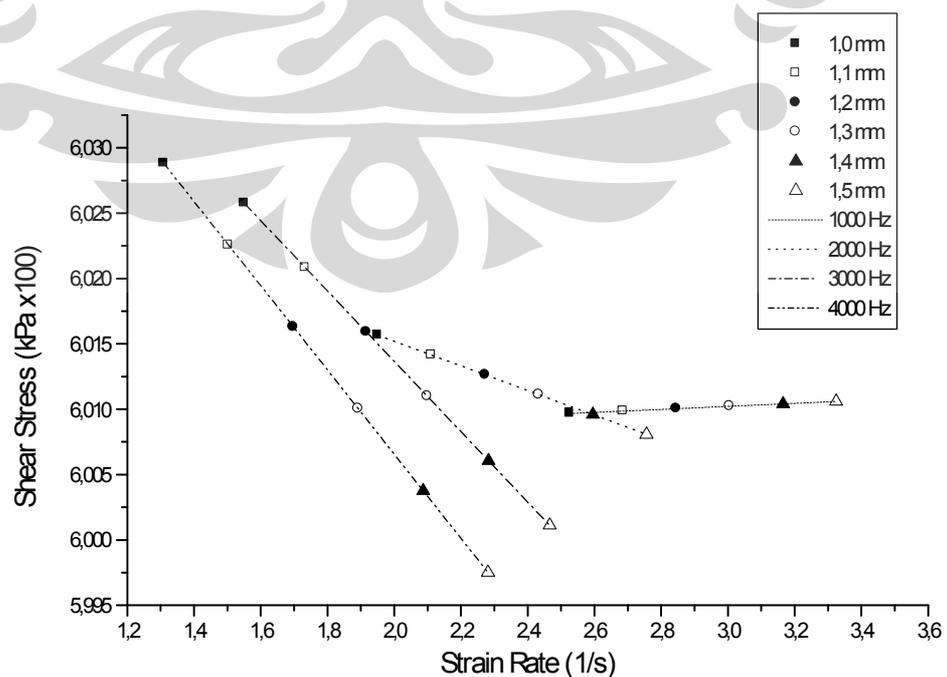
Gambar 4.19 Contoh Penggabungan Grafik sebuah fluida sampel pada tegangan 2000 Hz

Demikianlah contoh proses pengolahan data yang dilakukan pada data hasil penelitian yang dilakukan. Demikian juga perhitungan tersebut dilakukan untuk percobaan dengan kedua pelat paralel yang membentuk sudut sebesar 5^0 , 10^0 , 15^0 , 20^0 .

4.3 Analisa Data Sampel

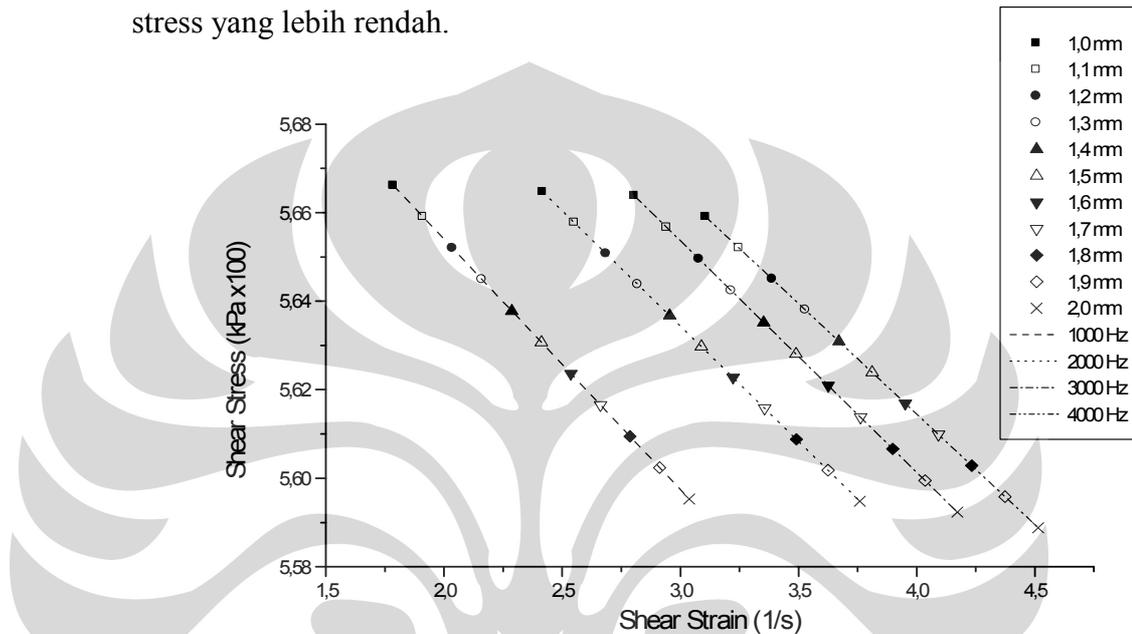
Data yang penulis peroleh dari hasil penelitian mengenai pengaruh gap antar pelat datar terhadap shear stress beberapa fluida sample pada tegangan sebesar 2000 Hz dapat dilihat pada gambar 4.19. Pada grafik diatas dapat terlihat bahwa dengan penambahan jarak diantara kedua pelat paralel mengakibatkan penurunan nilai shear stress yang diterima oleh fluida sampel. Bentuk penurunan nilai shear stress pun beragam tergantung pada kekentalan fluida sampel. Sebagai contoh, dapat kita bandingkan antara grafik oil dengan grafik Grease type A. Meskipun range gap yang diterapkan sama, antara 1,0 mm-2,0 mm, tetapi terdapat perbedaan nilai shear stress dan juga bentuk penurunan grafiknya. Hal ini juga dapat dikarenakan oleh kandungan material yang terdapat pada kedua fluida tersebut.

Bila kita bandingkan shear stress dengan shear strain fluida sampel tersebut, maka dapat diperoleh grafik seperti berikut:



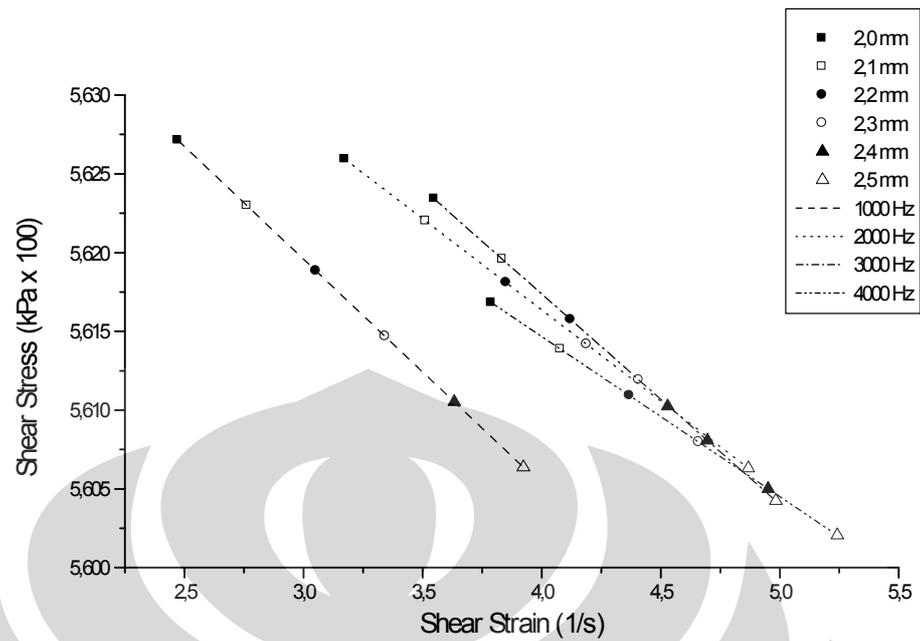
Gambar 4.20 Grafik Shear Stress-Strain Rate Crude oil

Pada grafik diatas terlihat bahwa semakin diberi tegangan maka nilai strain rate fluida tersebut mengalami penurunan. Kemiringan penurunan nilai shear stress pun semakin terjal. Dengan kata lain, optimalisasi energi fluida crude oil saat dialirkan adalah pada kecepatan rendah. Sebab, pada 1000 Hz nilai strain rate fluida tersebut cukup jauh dengan nilai shear stress yang lebih rendah.



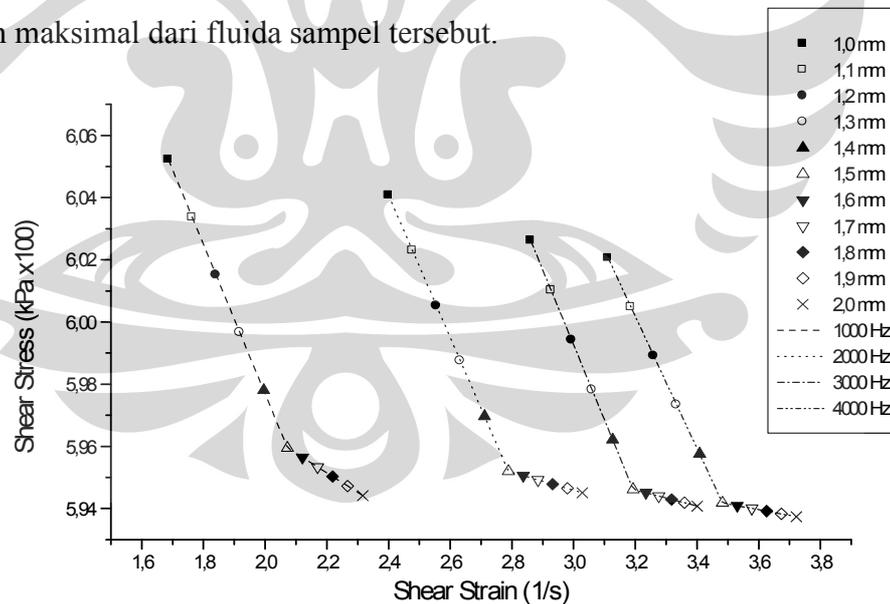
Gambar 4.21 Grafik Shear Stress-Strain Rate Grease Type A

Grafik diatas juga menggambarkan mengenai regangan yang terjadi pada grease dengan kekentalan rendah dimana semakin tegangan diberikan, maka nilai shear strain fluida ini juga ikut meningkat. Tetapi dengan bertambahnya tegangan yang diberikan, range shear strain pun semakin menurun. Hal ini dapat dilihat dari semakin rapatnya sebaran data seiring dengan penambahan tegangan yang diberikan.



Gambar 4.22 Grafik Shear Stress-Strain Rate Grease Type B

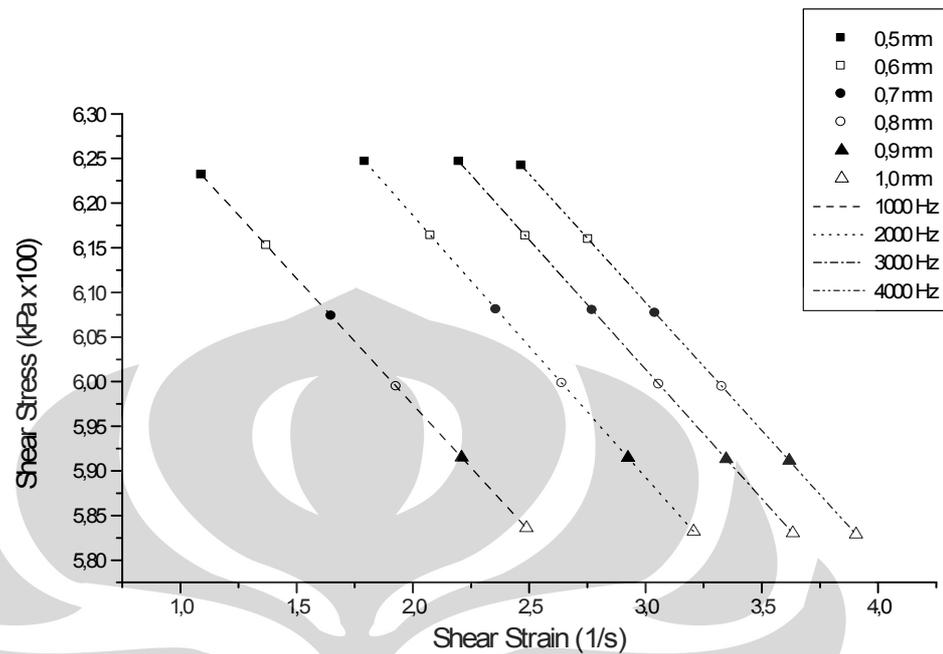
Lain halnya dengan bentuk grafik yang dimiliki oleh grease type B ini dimana kekentalannya $\pm \frac{1}{2}$ kali lebih kental dari grease type A. Grafik ini sudah mulai saling *overlapping* pada tegangan 2000 Hz. Hal ini menunjukkan regangan maksimal dari fluida sampel tersebut.



Gambar 4.23 Grafik Shear Stress-Strain Rate Oli

Kenaikan frekuensi getaran yang diberikan pada oli akan diikuti dengan penurunan kekentalan fluida dan pada kondisi tertentu efek

kenaikan kecepatan akan menjadi konstan sesuai dengan nilai index viskositas dari fluida oli.



Gambar 4.24 Grafik Shear Stress-Strain Rate Pasta Gigi

Grafik shear stress-shear strain fluida pasta gigi di atas memiliki bentuk grafik yang mirip dengan fluida grease type A, hanya saja shear stress yang diterima oleh fluida pasta gigi lebih tinggi dibanding grease type A. Perbedaan nilai shear stress fluida dapat dikarenakan oleh tingkat kekentalan sebuah fluida.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan pada hasil percobaan terhadap beberapa fluida sampel dengan menggunakan bantuan *Piezoactuator*, diperoleh kesimpulan bahwa setiap fluida memiliki karakteristik berbeda pada saat diberikan tegangan. Kekentalan fluida tidak hanya dipengaruhi oleh temperatur, tetapi juga oleh kecepatan dan waktu (fluida Non-Newtonian). penambahan jarak antara kedua pelat paralel dapat mempengaruhi nilai shear stress yang diterima dan juga mempengaruhi viskositas fluida dimana dapat dilihat dari meningkat atau berkurangnya nilai strain rate fluida setiap penambahan tegangan diberikan.

Nilai shear stress yang lebih rendah berdampak pada turunnya energi yang diperlukan oleh fluida tersebut untuk dialirkan baik dalam pipa atau untuk pelumasan. Dengan turunnya energi yang digunakan, maka biaya juga dapat ditekan.

5.2 Saran

Alat *Piezoactuator* yang kami gunakan dalam meneliti masih memerlukan banyak penyempurnaan dari berbagai aspek, diantaranya adalah:

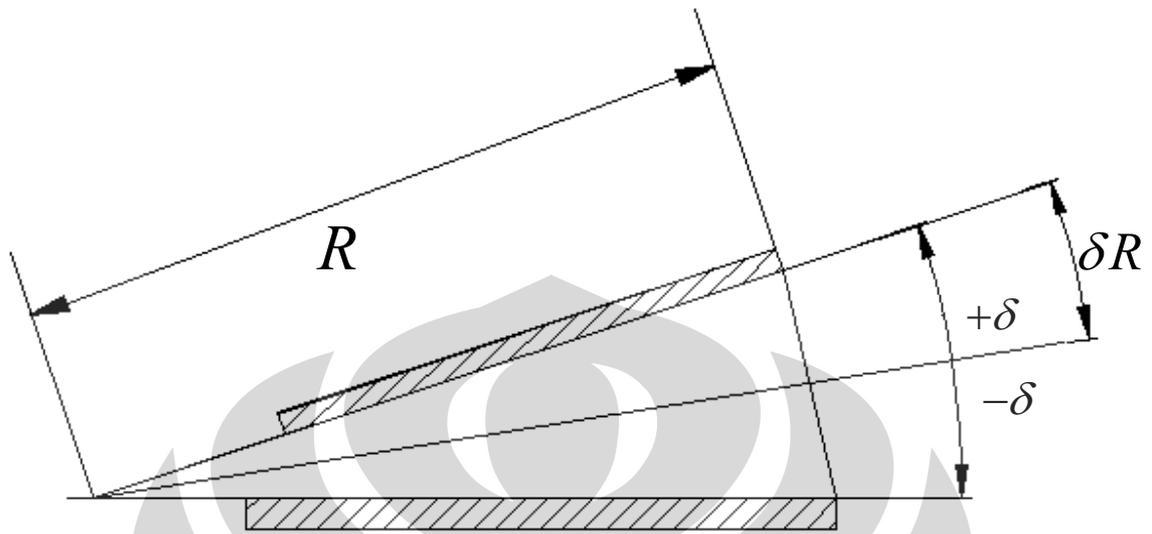
- Pemasangan *Piezzo-acctuator* yang lebih baik guna menghindari rusak atau patah atau tidak berfungsinya alat tersebut.
- Penempatan *strain gauge* (laser) yang lebih rigid guna menghindari kesulitan maupun kesukaran dalam mendapatkan data sampel.
- Dalam penelitian pelat miring, diusahakan agar membuat pelat dengan tanpa mereduksi getaran dari *Piezoactuator* dan sudut kemiringan yang dapat dikontrol sehingga proses penelitian menjadi lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. D. Weiss, J. P. Coulter, and J. D. Carlson, *J. Intell. Mater. Syst. Struct.* 4, 248 (1993).
- [2] J. L. Sproston, R. Stanway, and A. Faghmous, *Rev. Gen. Electr.* 21, 21 (1991).
- [3] G. J. Monkman, *J. Phys. D* 28, 588 (1995).
- [4] S. L. Viera, M. Nakano, R. Oke, and T. Nagata, *Int. J. Mod. Phys. B* 15, 714 (2001).
- [5] S. H. Chu, S. J. Lee, and K. H. Ahn, *J. Rheol.* 44, 105 (2000).
- [6] V. Noresson and N. G. Ohlson, *Mater. Des.* 22, 651 (2001).
- [7] Parthasarthy, M. And Klingenberg, D. J., *Electrorheology Mechanisms and Modeling, Mat. Sci. Eng., Vol R 17* (1996), pp.57-103.
- [8] See, H., *Advances in Modelling the Mechanisms and Rheology of Electrorheological Fluids, Korea Australia Rheology Journal, Vol.11* (1999), pp.169-195.
- [9] Narumi, T., Maeda, H., Hasegawa, T. And Sakai, M., *Electrorheological Effect of Liquid Crystal in Narrow Gaps, Proc. JSME ICFE '97, Vol.1* (1997), pp.497-500.
- [10] Narumi, T., See, H., Yamaguchi, Y. And Hasegawa, T., *Electrorheological Response of Liquid Crystal Under Oscillatory Squeeze Flow, Proc. JSME 2004, Vol.48 No.3* (2005)
- [11] [www.wikipedia.com \(http://en.wikipedia.org/wiki/piezoelectricity\)](http://en.wikipedia.org/wiki/piezoelectricity)
- [12] Johansson Kristin and Standing Mats, *Methodology and measurements of Extensional Rheology by Contraction an Squeeze flow, Nordic Rheology Society, Vol.11* (2003)

- [13] H. T See, J. S Field, B Pfister, The Response of Electrorheological Fluid Under Oscillatory Squeeze Flow. *J. Non-Newtonian Fluid Mech.* 84 (1999) 149-158.
- [14] S. H. Chu, S. J. Lee, An Experimental Study on the Squeezing Flow of Electrorheological suspensions, *J. Rheol.* 44 (2000) 105-120.
- [15] C. Y. Lee, C. Y. Wen, The Oscillatory Squeeze Flow of electrorheological Fluid Considering the Inertia Effect, *Smart Mat. Struct.* 11 (4) (2002) 553-560.
- [16] Y. Tian, S. Z. Wen, Y. G. Meng, Compression of electrorheological fluids under Different Initial Gap Distances, *Phys, Rev. E* 67 (5) (2003).
- [17] A. K. El Wahed, J. L. Sproston, R Stanway, E. W. Williams, An Improved Model of Electrorheological Fluids in Squeeze Flow Through Model Updating of The estimated Yield Stress, *J. Sound Vibr* 268 (3) (2003) 581-599.

LAMPIRAN



Assumption $\delta R \ll R$ narrow gap

$$R_e = \frac{\rho V \cdot \delta R}{\mu} \ll 1$$

$$V_r \sim O(V)$$

Order estimation $\theta \sim O(\delta)$

$$\gamma \sim O(R)$$

From eq. (3), $0 \left(\frac{\delta}{\delta \gamma} (\gamma v_r) \right) \sim 0 \left(\frac{\delta v \theta}{\delta \theta} \right)$

$$\frac{V_\theta}{V_r} \sim O(\theta) \sim O(\delta) \longrightarrow V_\theta \ll V_r$$

$$V_\theta \sim O(\delta V)$$

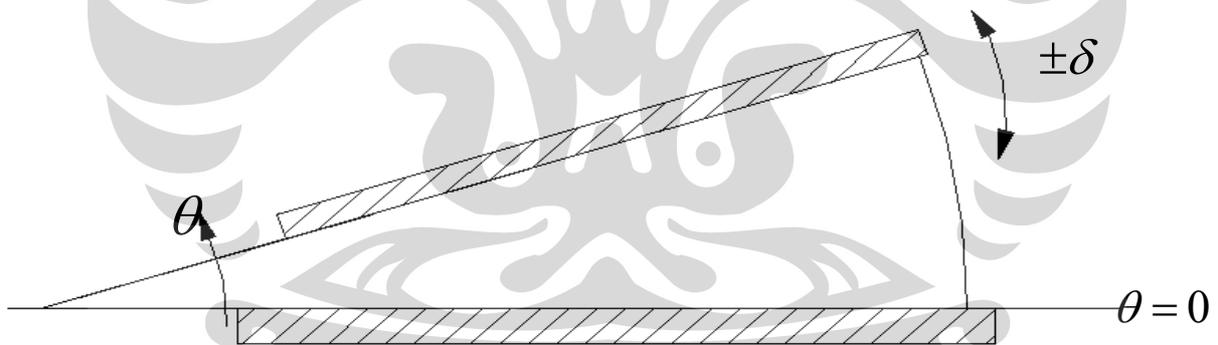
Pressure term $\frac{\delta P}{\delta r} \sim 0$ (viscous term)

Eq. 1 :

$$0 = -\frac{\delta P}{\delta r} + \mu \left[\frac{\delta}{\delta r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} (rVr) \right\} + \frac{1}{r^2} \frac{\delta^2 V r}{\delta \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\delta V \theta}{\delta \theta} \right]$$

Order	$\frac{\mu V}{R^2}$	$\frac{\mu V}{R^2 \delta^2}$	$\frac{\mu V}{R^2} \frac{\delta V}{\delta}$
$x(R^2 \delta^2 / \mu V)$	δ^2	1	δ^2

Thus,
$$0 = -\frac{\delta P}{\delta r} + \frac{\mu}{R^2} \frac{\delta^2 V r}{\delta \theta^2}$$



$$\frac{\delta}{\delta r} \left\{ \frac{1}{r} \left(-\frac{\delta V \theta}{\delta \theta} \right) \right\} + \frac{1}{r^2} \frac{\delta^2 V r}{\delta \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\delta V \theta}{\delta \theta}$$

$$\frac{1}{r^2} \frac{\delta V \theta}{\delta \theta} - \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} \left(\frac{\delta V \theta}{\delta \theta} \right) + \dots - \dots$$

Pipa Bulat (r,θ,z), stoke approximation $\frac{\delta}{\delta Z} = 0$

$$\rho \frac{\delta V_r}{\delta t} = -\frac{\delta P}{\delta r} + \mu \left[\frac{\delta}{\delta r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} (r V_r) \right\} + \frac{1}{r^2} \frac{\delta^2 V_r}{\delta \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\delta V_\theta}{\delta \theta} \right] \quad (1)$$

$$\rho \frac{\delta V_\theta}{\delta t} = -\frac{1}{r} \frac{\delta P}{\delta \theta} + \mu \left[\frac{\delta}{\delta r} \left\{ \frac{1}{r} \frac{\delta}{\delta r} (r V_\theta) \right\} + \frac{1}{r^2} \frac{\delta^2 V_\theta}{\delta \theta^2} - \frac{2}{r^2} \frac{\delta V_r}{\delta \theta} \right] \quad (2)$$

$$\frac{\delta}{\delta r} (r V_r) + \frac{\delta V_\theta}{\delta \theta} = 0 \quad (3)$$

Boundary Condition

$$\begin{aligned} \theta = 0 & : V_\theta = 0 \\ \theta = \pm \delta & : V_\theta = \pm r \frac{d\delta}{dt}, \quad V_r = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

From e.q. (3)

$$-\int_{-\delta}^{\delta} \frac{\delta V_\theta}{\delta \theta} d\theta = \int_{-\delta}^{\delta} \frac{\delta}{\delta r} (r V_r) d\theta \quad (5)$$

From e.q. (1)

$$\frac{\delta^2 V_r}{\delta \theta^2} = \frac{r^2}{\mu} \frac{\delta P}{\delta r}; V_r = \frac{1}{\mu} \frac{\delta P}{\delta r} r^2 \left(\frac{1}{2} \theta^2 + C_1 \theta + C_2 \right)$$

$$\theta = \pm \delta, \quad V_r = 0 \quad C_1 = 0 \quad C_2 = -\frac{1}{2} \varepsilon^2$$

$$V_r = -\frac{\delta^2}{2\mu} \frac{\delta P}{\delta r} r^2 \left\{ 1 - \left(\frac{\theta}{\delta} \right)^2 \right\} \quad (6)$$

e.q.(6) e.q. (5)

$$\begin{aligned} -2r \frac{d\delta}{dt} &= \int_{-\delta}^{\delta} \frac{\delta}{\delta r} \left(-\frac{\delta^2}{2\mu} \frac{\delta P}{\delta r} r^3 \right) \cdot \left\{ 1 - \left(\frac{\theta}{\delta} \right)^2 \right\} d\theta \\ &= -\frac{\delta^2}{2\mu} \frac{\delta}{\delta r} \left(\frac{\delta P}{\delta r} r^3 \right) \cdot \delta \left[\xi - \frac{1}{3} \xi^3 \right]_{\xi=-1}^1 \\ &= -\frac{2\delta^3}{3\mu} \frac{\delta}{\delta r} \left(\frac{\delta P}{\delta r} r^3 \right) \end{aligned}$$

$$\frac{\delta}{\delta r} \left(\frac{\delta P}{\delta r} r^3 \right) = 2r \frac{d\delta}{dt} \times \frac{3\mu}{2\delta^3} = \frac{3\mu r}{\delta^3} \frac{d\delta}{dt}$$

$$\frac{\delta P}{\delta r} r^3 = \frac{3\mu}{2\delta^3} r^2 \frac{d\delta}{dt} + C_1$$

$$\frac{\delta P}{\delta r} = \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \frac{1}{r} + \frac{C_1}{r^3}$$

$$P = \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln r - \frac{C_1}{2r^2} + C_2$$

$$r = r_i, r_0 \quad P = P_0$$

$$P_0 = \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln r_i - \frac{C_1}{2r^2} + C_2$$

$$P_0 = \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln r_o - \frac{C_1}{2r_o^2} + C_2$$

$$0 = -\frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln \frac{r_o}{r_i} - \frac{C_1}{2} \left(\frac{1}{r_i^2} - \frac{1}{r_o^2} \right)$$

$$C_1 = -\frac{3\mu}{\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln \frac{r_o}{r_i} \times \frac{r_o^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1}$$

$$C_2 = P_0 - \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln r_i - \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln \frac{r_o}{r_i} \times \frac{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1}$$

$$= P_0 - \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \times \left\{ \frac{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \ln \frac{r_o}{r_i} + \ln r_i \right\}$$

$$P = \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln r + \frac{1}{2r_o^2} \cdot \frac{3\mu}{\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \frac{r_o^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \ln \frac{r_o}{r_i}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \times \left\{ \frac{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \ln \frac{r_o}{r_i} + \ln r_i \right\} + P_0 \\
&= \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln \frac{r}{r_i} + \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \frac{\left(\frac{r_o}{r}\right)^2 - \left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \ln \frac{r_o}{r_i} + P_0 \\
&= \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \left\{ \ln \frac{r}{r_i} - \frac{\left(\frac{r_o}{r}\right)^2 - \left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \ln \frac{r_o}{r_i} \right\} + P_0 \\
&= \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \left\{ \ln \frac{r}{r_i} - \frac{1 - \left(\frac{r_i}{r}\right)^2}{1 - \left(\frac{r_i}{r_o}\right)^2} \ln \frac{r_o}{r_i} \right\} + P_0
\end{aligned}$$

$$I_1 = \int_{r_i}^{r_o} \ln \frac{r}{r_i} dr = r_i \int_1^\alpha \ln \xi d\xi = r_i [\xi \ln \xi - \xi]_1^\alpha$$

$$= r_i (\alpha \ln \alpha - \alpha + 1)$$

$$I_2 = \int_{r_i}^{r_o} \ln \left(\frac{r}{r_i} \right)^2 dr = r_i \int_1^\alpha \frac{d\xi}{\xi^2} = -r_i \left[\frac{1}{\xi} \right]_1^\alpha = r_i \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right) = r_i \frac{\alpha - 1}{\alpha}$$

$$I_3 = \int_{r_i}^{r_o} dr = r_o - r_i = r_i (\alpha - 1)$$

$$F = \int_{r_i}^{r_o} P dr = \frac{3\mu r_i}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \left\{ (\alpha \ln \alpha - \alpha + 1) - \frac{(\alpha - 1) - \left(\frac{\alpha - 1}{\alpha} \right) \ln \alpha}{1 - \alpha^{-2}} \right\} + r_i (\alpha - 1) P_0$$

$$= \frac{3\mu r_i}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \left\{ (\alpha \ln \alpha - \alpha + 1) - \frac{\alpha(\alpha - 1)}{\alpha + 1} \ln \alpha \right\} + r_i (\alpha - 1) P_0$$

$$= r_i (\alpha - 1) \left[\frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \left\{ \frac{\alpha(\alpha + 1 - \alpha + 1)}{(\alpha + 1)(\alpha - 1)} \ln \alpha - 1 \right\} + P_0 \right]$$

$$= r_i (\alpha - 1) \left[\frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \left\{ \frac{2\alpha}{(\alpha^2 - 1)} \ln \alpha - 1 \right\} + P_0 \right]$$

$$\delta = \delta_0 + \varepsilon \sin \omega t, \quad \frac{d\delta}{dt} = \varepsilon \omega \cos \omega t$$

$$F = (\alpha - 1)r_i \left[\frac{3\mu\omega\varepsilon}{2\delta^3} \left\{ \frac{2\alpha}{(\alpha^2 - 1)} \ln \alpha - 1 \right\} \cos \omega t + P_0 \right]$$

$$= (r_0 - r_i)r_i \left[\frac{3\mu\omega\varepsilon}{2\delta^3} \left\{ \frac{2\alpha}{(\alpha^2 - 1)} \ln \alpha - 1 \right\} \cos \omega t + P_0 \right]$$

$$F = \frac{\mu r_i}{\delta^3} \frac{d\delta}{dt} f(\alpha) \quad t.F = \int_0^t |F| dt$$

$$= -2 \int_{d_0 - \varepsilon}^{d_0 - \varepsilon} \frac{\mu r_i}{\delta^3} f(\alpha) d\delta = \left[\frac{\mu r_i}{\delta^2} f(\alpha) \right]_{d_0 - \varepsilon}^{d_0 - \varepsilon}$$

$$\omega T = 2\pi, T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$F = -\frac{\omega}{2\pi} \mu r_i f(\alpha) \left[\frac{1}{(\delta_0 - \varepsilon)^2} - \frac{1}{(\delta_0 + \varepsilon)^2} \right] = \frac{-2\mu r_i \omega \varepsilon \delta_0 f(\alpha)}{\pi (\delta_0 - \varepsilon)^2 (\delta_0 + \varepsilon)^2}$$

$$\frac{\delta P}{\delta r} = \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \frac{1}{r} - \frac{1}{r^3} \frac{3\mu}{\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \ln \frac{r_o}{r_i} \times \frac{r_o^2}{\left(\frac{r_o}{r_i} \right)^2 - 1}$$

$$= \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \frac{1}{r} \left\{ 1 - \frac{2 \left(\frac{r_o}{r} \right)^2}{\left(\frac{r_o}{r_i} \right)^2 - 1} \ln \frac{r_o}{r_i} \right\}$$

$$V_r = -\frac{\delta^2}{2\mu} \frac{3\mu}{2\delta^3} \frac{d\delta}{dt} \frac{1}{r} \left\{ 1 - \frac{2\left(\frac{r_o}{r}\right)^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \ln \frac{r_o}{r_i} \right\} r^2 \left\{ 1 - \left(\frac{\theta}{\delta}\right)^2 \right\}$$

$$= -\frac{3\mu}{4\delta} \frac{d\delta}{dt} \left\{ 1 - \frac{2\left(\frac{r_o}{r}\right)^2}{\left(\frac{r_o}{r_i}\right)^2 - 1} \ln \frac{r_o}{r_i} \right\} \times r \left\{ 1 - \left(\frac{\theta}{\delta}\right)^2 \right\}$$

$$r = r_0, \quad \theta = 0$$

$$V_r = -\frac{3r_0}{4\delta} \frac{d\delta}{dt} \left(1 - \frac{2 \ln \alpha}{\alpha^2 - 1} \right)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \varepsilon \omega$$

$$V_{r_{\max}} = -\frac{3r_0 \omega \varepsilon}{4\delta} \left(1 - \frac{2 \ln \alpha}{\alpha^2 - 1} \right)$$

$$R_e = \frac{\rho V_{r_{\max}} r_0 \delta}{\mu} = \frac{\rho \delta}{\mu} \cdot \frac{3r_0 \omega \varepsilon}{4\delta} \left(1 - \frac{2 \ln \alpha}{\alpha^2 - 1} \right)$$

$$= \frac{\rho r_0^2 \omega \varepsilon}{\mu} \times \frac{3}{4} \left(1 - \frac{2 \ln \alpha}{\alpha^2 - 1} \right)$$

Jadi, jika kita ingin mendapatkan nilai R_e yang lebih rendah, maka nilai $\frac{\epsilon}{\delta}$ harus kita turunkan juga.

Apabila kita ingin memperoleh nilai F yang besar, maka nilai δ pada sampel harus kita turunkan atau dapat juga dengan menurunkan nilai r_i

