



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK KURVA ALIRAN Al_2O_3 DAN TiO_2
PADA PIPA BULAT ($D = 3 \text{ mm}$)**

SKRIPSI

**ARIS ROSADI
0606077693**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK PERKAPALAN
DEPOK
JUNI 2010**



UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK KURVA ALIRAN Al_2O_3 DAN TiO_2
PADA PIPA BULAT ($D = 3 \text{ mm}$)**

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
sarjana teknik**

**ARIS ROSADI
0606077693**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK PERKAPALAN
DEPOK
JUNI 2010
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

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

Nama : Aris Rosadi

NPM : 0606077693

Tanda Tangan :

Tanggal :

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Aris Rosadi
NPM : 0606077693
Program Studi : Teknik Perkapalan
Judul Skripsi : Karakteristik Kurva Aliran Al_2O_3 dan TiO_2
pada Pipa Bulat ($D = 3 \text{ mm}$)

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. M. A. Talahatu, M.T. (.....)
Penguji : Ir. Hadi Tresno Wibowo (.....)

Ditetapkan di : Depok
Tanggal :

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian dan penyusunan skripsi yang berjudul Karakteristik Kurva Aliran Al_2O_3 dan TiO_2 pada Pipa Bulat ($D = 3 \text{ mm}$).

Dalam kesempatan ini, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam penelitian dan penyusunan skripsi ini, antara lain:

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. Ir. Sunaryo, Ph.D, Ir. M. A. Talahatu, M.T, Ir. Hadi Tresno Wibowo, Ir. Mukti Wibowo selaku dosen pada program studi Teknik Perkapalan yang telah membagikan ilmu dan pengalamannya.
3. Seluruh Dosen dan karyawan Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia.
4. Ayah dan Ibu yang akan selamanya menjadi panutan penulis. Ibu yang tanpa henti memberikan doa, dukungan dan motivasi yang sangat bermakna bagi penulis bahkan pada masa-masa *kritis* penulis. Kakak serta adik penulis, Ajat Sudrajat SH, Chaeriyah Fazri, yang selalu memberikan *jiwa* dan memadamkan kejenuhan ini. Semangat ini tidak pernah mati, terdedikasikan penuh untuk kalian, keluarga yang sangat penulis sayangi.
5. Muhammad Baqi, S.T. dan Gunawan, S.T. untuk segala bantuan.
6. Teman-teman seperjuangan: Firdi Trijuliono khususnya, Serta teman-teman Teknik Mesin dan Teknik Perkapalan 2006 atas warna-warni kehidupan selama 4 tahun.
7. Keluarga Besar Bapak Podo Khususnya Putri Melani, Amd yang telah menemani dan member dukungan selama ini.
8. Seluruh pihak yang telah memberi dukungan yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu. Terima kasih banyak.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penelitian dan penyusunan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun sebagai proses penyempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang membutuhkan.

Penulis,
2010



TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

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

Nama : Aris Rosadi
NPM : 0606077693
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 Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

Karakteristik Kurva Aliran Al_2O_3 dan TiO_2 pada Pipa Bulat ($D = 3 \text{ mm}$)

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan memublikasikan 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 :

Yang menyatakan

(Aris Rosadi)

ABSTRAK

Aris Rosadi

Teknik Perkapalan

Karakteristik Kurva Aliran Al_2O_3 dan TiO_2
pada Pipa Bulat ($D = 3 \text{ mm}$)

Aplikasi praktis dari solusi nanopartikel telah dibatasi karena memiliki dampak yang buruk pada degradasi mekanik. Tujuan penelitian ini adalah untuk menguji karakteristik aliran nanofluida. Hasil percobaan berupa kurva aliran dari nanofluida pada sebuah pipa kapiler yang mempunyai variabel tekanan. Yang diameter pipa tersebut adalah sebesar 3 mm. Tegangan geser dan regangan geser dihitung dengan mengukur *pressure drop* dan laju aliran volumetrik. Pengukuran *pressure drop* dilakukan untuk Al_2O_3 dan TiO_2 (konsentrasi 1%, 3% dan 5%) dengan menggunakan *pressure transducer*. *Power Law Index* berada pada kisaran harga 0,95 ~ 1,0. Koefisien gesekan nanofluida yang telah didapat, dibandingkan dengan data dari air murni yang digambarkan dengan persamaan Blasius.

Kata kunci : *pressure drop*, Alumina, Titanium Dioksida, kurva aliran
xvi + 69 halaman; 16 gambar; 22 tabel; 30 lampiran
Bibliografi : 19 (1973-2008)

ABSTRACT

Aris Rosadi

Naval Engineering

Characteristics of Flow Curve of Al_2O_3 and TiO_2
in Circullar Pipe ($D = 3 \text{ mm}$)

The practical application of the nanoparticle of solutions has been limited because it has an adverse effect on mechanical degradation. The aim of this study is to examine characteristics of flow properties of nanofluid. Experiments are carried out the measurement of the flow curve of the nanofluid by a capillary pipe applying variable pressure driven flow. It is 3 mm in the diameter of the capillary. The shear stress and the shear strain are calculated by measuring the pressure drop and the volumetric flow rate, respectively. Measurements of pressure drop are carried out for Al_2O_3 and TiO_2 at 1%, 3%, 5% particle volume with pure water by a pressure transducer. The power law exponent are about $0.95 \leq 1.0$. The friction coefficient of nanofluid in a capillary pipe are fit with pure water data as Blasius's equation..

Keywords : pressure drop, Alumina, Titanium Dioxide, flow curve

xvi + 69 pages; 16 figures; 22 tables; 30 appendixes

Bibliografi : 19 (1973-2008)

DAFTAR ISI

	halaman
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	i
PENGESAHAN	ii
KATA PENGANTAR	iii
PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	01
1.2 Tujuan Penulisan	03
1.3 Metode Penelitian	03
1.4 Batasan Masalah	03
1.5 Metode Penulisan	04
1.6 Sistematika Penulisan	05
BAB II LANDASAN TEORI	
2.1 Fluida	06
2.1.1 Klasifikasi Fluida	06
2.1.2 Aliran Fluida	12
2.1.3 Sifat-sifat Fluida	13
2.1.4 Persamaan Fluida	16
2.2 Nanofluida	19
2.2.1 Konsep Nanofluida	19

2.2.2 Perkembangan Nanofluida	19
2.2.2.1 Konduktivitas Termal Nanofluida sebagai Fungsi Ukuran Partikel...20	
2.2.2.2 Konduktivitas Termal Nanofluida sebagai Fungsi Temperatur.....24	
2.2.3 Mengukur Konduktivitas Termal pada Cairan	25
2.2.3.1 Transient Hot-Wire Method	25
2.2.3.2 Temperature Oscilation Method	28
2.2.4 Perpindahan Kalor Konveksi pada Nanofluida	31
2.2.4.1 Konveksi Paksa	34
2.2.5 Pembuatan Nanofluida	36
2.2.5.1 Metode Satu Langkah	37
2.2.5.2 Metode Dua Langkah	38
BAB III DESKRIPSI ALAT UJI DAN PROSEDUR PENGUJIAN	
3.1 Rancangan Alat Uji	40
3.2 Peralatan Pendukung	41
3.3 Kondisi Dalam Pengujian	43
3.4 Prosedur Pengambilan Data	44
3.5 Tahapan Pengujian	44
BAB IV PENGOLAHAN DAN ANALISA DATA	
4.1 Perhitungan Data	46
4.1.1 Data TiO_2	46
4.1.2 Data Al_2O_3	55
4.2 Analisis Data	63
BAB V KESIMPULAN	
5.1 Kesimpulan	69
5.2 Saran	69
DAFTAR PUSTAKA	70

DAFTAR GAMBAR

	halaman
Gambar 2.1 Hubungan antara shear stress – shear rate pada fluida non-newtonian	07
Gambar 2.2 Distribusi Kecepatan <i>bingham plastic fluid</i> pada pipa	08
Gambar 2.3 Hubungan shear stress (τ) - shear rate ($\dot{\gamma}$) pada thixotropic (a) dan rheopectic (b) yang tergantung pada waktu	09
Gambar 2.4 Distribusi Tegangan Aliran Laminar dalam Pipa Bulat.....	11
Gambar 2.5 Distribusi Kecepatan <i>laminar dan turbulent</i> pada pipa bulat	17
Gambar 2.6 Pengukuran perbedaan tekanan pada pitot tube	18
Gambar 2.7 Foto TEM dari Penggumpala Bubuk Nano Partikel	25
Gambar 2.8 Alat Transient Hot Wire	27
Gambar 2.9 Sirkuit Elektrik dari Alat Transient Hot Wire	27
Gambar 2.10 Akurasi Pengukuran dari Transient Hot Wire	28
Gambar 2.11 Alat Pengujian	29
Gambar 2.12 Konstruksi dari Test Cell	30
Gambar 2.13 Osilasi Temperatur yang dicatat oleh Das, S.K. et al.	31
Gambar 2.14 Foto TEM dari Nanopartikel yang Terdispersi	37
Gambar 3.1 Instalasi alat uji	41
Gambar 3.2 Manometer	42
Gambar 3.3 Valve dengan Busur Derajat	43
Gambar 3.4 Penampung cairan Fluida	43
Gambar 4.1 Karakteristik Reologi TiO_2	64

Gambar 4.2 Karakteristik Reologi Al_2O_365
Gambar 4.3 Apparent Viscosity dari TiO_265
Gambar 4.4 Minor Apparent Viscosity dari Al_2O_366
Gambar 4.5 Koefisien Gesek TiO_2 pada Pipa Bulat ($D = 3 \text{ mm}$) Horizontal.....67	
Gambar 4.6 Koefisien Gesek Al_2O_3 pada Pipa Bulat ($D = 3 \text{ mm}$) Horizontal.....68	



DAFTAR TABEL

	halaman
Tabel 2.1 Konduktivitas Termal dari Beberapa Material	20
Tabel 2.2 Perbandingan antara Mikropartikel dengan Nanopartikel	22
Tabel 4.1 Data Hasil Percobaan TiO ₂ (5%)	46
Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Debit, Kecepatan dan ΔP	47
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Tegangan Geser dan Gradient Kecepatan	48
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Apparent Viscosity dan Gradient Kecepatan.....	48
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Bilangan Reynolds dan Koefisien Gesekan.....	49
Tabel 4.6 Data Hasil Percobaan T iO ₂ (3%)	49
Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Debit, Kecepatan dan ΔP	50
Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Tegangan Geser dan Gradient Kecepatan.....	50
Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Apparent Viscosity dan Gradient Kecepatan	51
Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Bilangan Reynolds dan Koefisien Gesekan	51
Tabel 4.11 Data Hasil Percobaan T iO ₂ (1%)	52
Tabel 4.12 Hasil perhitungan debit, Kecepatan dan ΔP	53
Tabel 4.13 Hasil Perhitungan Tegangan Geser dan Gradient Kecepatan	53
Tabel 4.14 Hasil Perhitungan Apparent Viscosity dan Gradient Kecepatan	54
Tabel 4.15 Hasil Perhitungan Bilangan Reynolds dan Koefisien Gesekan	54
Tabel 4.16 Data Hasil Percobaan Al ₂ O ₃ (5%)	55
Tabel 4.17 Hasil perhitungan debit, Kecepatan dan ΔP	56
Tabel 4.18 Hasil Perhitungan Tegangan Geser dan Gradient Kecepatan	56
Tabel 4.19 Hasil Perhitungan Apparent Viscosity dan Gradient Kecepatan	57

Tabel 4.20 Hasil Perhitungan Bilangan Reynolds dan Koefisien Gesekan	57
Tabel 4.21 Data Hasil Percobaan Al_2O_3 (3%)	58
Tabel 4.22 Hasil perhitungan debit, Kecepatan dan ΔP	59
Tabel 4.23 Hasil Perhitungan Tegangan Geser dan Gradient Kecepatan	59
Tabel 4.24 Hasil Perhitungan Apparent Viscosity dan Gradient Kecepatan	60
Tabel 4.25 Hasil Perhitungan Bilangan Reynolds dan Koefisien Gesekan	60
Tabel 4.26 Data Hasil Percobaan Al_2O_3 (1%)	61
Tabel 4.27 Hasil perhitungan debit, Kecepatan dan ΔP	62
Tabel 4.28 Hasil Perhitungan Tegangan Geser dan Gradient Kecepatan	62
Tabel 4.29 Hasil Perhitungan Apparent Viscosity dan Gradient Kecepatan	63
Tabel 4.30 Hasil Perhitungan Bilangan Reynolds dan Koefisien Gesekan	63

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan dewasa ini dalam teknologi nano telah menciptakan suatu kelas fluida baru dan agak khusus, disebut nanofluida, yang muncul sebagai fluida yang memiliki potensi yang besar untuk aplikasi pendinginan (U.S. Choi, 1996). Istilah nanofluida berarti dua campuran fase dimana fase yang kontinu biasanya cairan dan fase yang terdispersi terdiri dari nanopartikel padat yang sangat halus, berukuran lebih kecil daripada 50 nm. Beberapa dispersi nanopartikel dari keperluan rekayasa sebenarnya dibuat dan secara komersial tersedia (*Nanophase Technologies, Romeoville*).

Penelitian terhadap nanofluida mulai banyak dilakukan untuk menunjukkan bahwa nanofluida berpotensi untuk menjadi fluida kerja alternatif yang memiliki koefisien perpindahan kalor yang lebih baik. Nanofluida adalah campuran antara partikel padat yang memiliki diameter dalam ukuran nanometer dengan fluida dasarnya. Partikel berukuran nanometer tersebut tersuspensi dalam fluida dasar secara permanen yang dikarenakan adanya efek Brownian pada partikel tersebut. Sebelum nanofluida tersebut dapat diaplikasikan untuk keperluan komersial, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk menyempurnakannya (Putra, Nandy et al., 2005).

Perkembangan penelitian tentang konduktivitas termal nanofluida telah banyak dilakukan oleh para peneliti terdahulu dan menunjukkan bahwa nanofluida merupakan fluida kerja yang cukup handal dalam proses perpindahan kalor konduksi. U.S. Choi (1995), adalah orang pertama yang menggunakan istilah nanofluida yang menunjukkan fluida dengan nano partikel tersuspensi. Eastmann, J.A. et al. (1997), menunjukkan bahwa peningkatan konduktivitas termal sekitar 60% dapat dicapai untuk

nanofluida terdiri dari air dan volume 5% nanopartikel CuO. Yimin Xuan dan Qiang Li (2000), juga melakukan penelitian tentang peningkatan perpindahan kalor pada nanofluida. Mereka menjelaskan suatu prosedur untuk mempersiapkan nanofluida dengan menggunakan peralatan *hot wire* untuk mengukur konduktivitas termal nanofluida dengan nanopartikel bubuk tembaga yang tersuspensi. Das, S.K. et al. (2003), melakukan pengukuran diffusivitas termal dan konduktivitas termal pada nanofluida dengan nanopartikel Al₂O₃ atau CuO sebagai bahan suspensinya. Das, S.K. et al. (2003), meneruskan penelitiannya mengenai konduktivitas termal pada nanopartikel Au yang diukur dengan media air dan toluene. Mansoo Choi et al. (2003), penelitiannya tentang konduktivitas termal pada *multiwalled carbon nanotubes* (CNTs). Dengan memperlakukan CNTs dan menggunakan asam nitrit terkonsentrasi untuk menguraikan kumpulan CNT dalam memproduksi nanofluida CNT. Phelan, P.E. et al. (2004), menggunakan teknik simulasi dinamika Brownian di dalam menghitung konduktivitas termal efektif dari nanofluida. Choi, U.S. et al. (2004), menemukan bahwa gerak Brownian dari nanopartikel pada tingkat skala nano dan molekul adalah suatu mekanisme pengatur sifat termal dari nanofluida.

Namun tercatat pula penelitian tentang nanofluida yang menunjukkan bahwa fluida tersebut merupakan fluida Newtonian. Hal ini didasarkan pada penelitian yang menggunakan persentase volum untuk menentukan konsentrasi campuran. Volume partikel ditentukan dengan menggunakan densitas sebenarnya dari partikel nano dan massanya dengan mengabaikan massa udara yang terpertangkap di dalamnya. Pencampuran partikel nano ke dalam fluida dasar mengakibatkan pembentukan karakteristik baru terhadap fluida yang dihasilkan, karakteristik yang terbentuk tergantung dengan fraksi volum dari partikel yang dicampurkan (U.S. Choi, 1995).

Pada penelitian ini, dipilih nanopartikel titanium dioksida (TiO₂) dan alumina (Al₂O₃) sebagai nanopartikel pembentuk nanofluida yang

akan diuji. Hal ini didasarkan terhadap harga yang murah dan umumnya nanopartikel tersebut dalam penelitian eksperimental.

1.2 Tujuan Penulisan

Tujuan umum penelitian ini adalah untuk menyempurnakan penelitian sebelumnya tentang nanofluida, guna mempersiapkan nanofluida sebagai fluida yang dapat digunakan secara komersil.

Tujuan khusus penelitian ini untuk mengetahui:

1. karakteristik kurva aliran nanofluida (TiO_2 dan Al_2O_3) pada pipa bulat ($D = 3 \text{ mm}$) horisontal;
2. kerugian jatuh tekanan (*pressure drop*) nanofluida (TiO_2 dan Al_2O_3) pada pipa bulat ($D = 3 \text{ mm}$) horisontal.

1.3 Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah dengan melakukan penelitian secara langsung di laboratorium dimana sampel nanofluida dibuat dengan cara mencampurkan partikel nano dengan *aquadest* yang kemudian diaduk/didispersikan dengan *ultrasonic vibration*. Penelitian meliputi pengujian lansung dan tidak langsung. Pengujian langsung adalah pengujian untuk mendapatkan variabel yang dapat diketahui dengan cara mengukur nilainya seperti perbedaan tekanan melalui perbedaan ketinggian manometer dan debit aliran. Sedangkan pengujian tidak langsung adalah mendapatkan variable dengan cara mengolahnya melalui berbagai formula yang ada sehingga didapatkan hasil dari variabel yang digunakan pada pengujian langsung seperti kapasitas aliran, kecepatan aliran dan bilangan Reynolds.

1.4 Batasan Masalah

Penelitian ini hanya bertujuan untuk mengetahui *rheological* aliran nanofluida (TiO_2 dan Al_2O_3) pada silinder kapiler horisontal.

1.5 Metode Penulisan

Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis melakukan beberapa metode, yaitu:

1. Konsultasi dengan dosen pembimbing

Tujuan daripada konsultasi dengan dosen pembimbing untuk merumuskan tema yang akan dibahas dalam skripsi serta alat uji yang harus dibuat untuk mendukung penelitian pada tema skripsi tersebut dan memperoleh informasi mengenai dasar teori yang digunakan dalam pengolahan data yang akan dilakukan serta hasil yang hendak diperoleh dari penelitian tersebut.

2. Membuat alat uji di laboratorium

Membuat alat uji laboratorium sesuai dengan rancangan awal yang telah dikonsultasikan dengan dosen pembimbing serta mengenai bahan-bahan yang akan digunakan dalam penelitian tersebut.

3. Pengumpulan data

Data-data yang diperoleh dari penelitian tersebut selanjutnya dibandingkan dengan dasar teori yang telah dijelaskan oleh dosen pembimbing, data-data dan keterangan didapat dari studi percobaan (data percobaan), studi literatur (dari sumber-sumber yang berhubungan dengan penelitian) serta melakukan diskusi dengan tim skripsi dan dosen pembimbing.

4. Pengolahan data

Data mentah dari penelitian kemudian dimasukkan ke dalam persamaan-persamaan yang terdapat pada dasar teori sehingga didapatkan data yang dibutuhkan yang kemudian digunakan untuk melakukan analisis dan proses selanjutnya.

5. Analisis data

Data-data dari pengolahan digunakan untuk menganalisis terjadinya kerugian jatuh tekanan (*pressure drop*) dan karakteristik kurva aliran pada pipa bulat ($D = 3 \text{ mm}$).

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan tugas akhir ini meliputi beberapa bab, yaitu:

BAB I: Bab ini membahas mengenai latar belakang permasalahan, tujuan penelitian, metode penelitian, batasan permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini, metode penulisan dalam hal ini bagaimana penulis mendapatkan informasi mengenai penelitian ini serta sistematika penulisan.

BAB II: Bab ini menjelaskan tentang landasan teori, jenis-jenis fluida, jenis aliran dalam pipa, sifat-sifat fluida, dan persamaan umum mekanika fluida.

BAB III: Bab ini menjelaskan tentang rancangan alat uji, peralatan-peralatan pendukung dalam pengujian, kondisi dalam pengujian serta prosedur pengujian dan pengambilan data.

BAB IV: Bab ini menjelaskan tentang pengolahan data, menampilkan data penelitian, grafik yang didapat dari pengujian, hasil dari pengujian serta analisis dari hasil penelitian.

BAB V: Bab ini merupakan bab penutup, pada bab ini diberikan kesimpulan serta saran seandainya penelitian ini akan dilanjutkan suatu saat sehingga memperoleh hasil yang lebih akurat.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Fluida

2.1.1 Klasifikasi Fluida

Fluida dapat diklasifikasikan menjadi beberapa bagian tetapi secara garis besar fluida dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian, yaitu :

a. Fluida *Newtonian*

Fluida *Newtonian* adalah suatu jenis fluida yang memiliki kurva shear stress dan gradient kecepatan yang linier, seperti air, udara, ethanol, benzene, dll. Fluida *Newtonian* akan terus mengalir dan viskositas fluida tidak berubah sekalipun terdapat gaya yang bekerja pada fluida. Viskositas fluida akan berubah jika terjadi perubahan temperature. Pada dasarnya fluida *Newtonian* adalah fluida yang mengikuti hukum Newton tentang aliran dengan persamaan :

$$\tau = \mu \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.1)$$

Dimana :

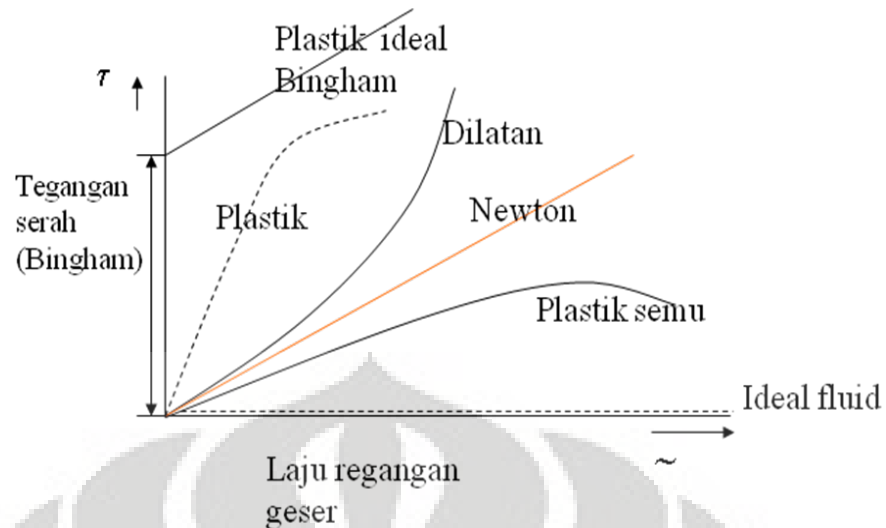
τ = Tegangan geser pada fluida

μ = Viskositas fluida

$\partial u/\partial y$ = Gradient kecepatan fluida

b. Fluida *Non-Newtonian*

Fluida *Non-Newtonian* adalah fluida yang tidak tahan terhadap tegangan geser (*shear stress*), gradient kecepatan (*shear rate*), dan temperature seperti cat, minyak pelumas, darah, bubur kertas, obat-obatan cair, dll. Viskositas fluida *Non-Newtonian* merupakan fungsi dari waktu dimana gradient kecepataannya tidak linier dan tidak mengikuti hukum Newton tentang aliran.



Gambar 2.1 Hubungan antara *shear stress* – *shear rate* pada fluida *non-newtonian*

Ada beberapa model pendekatan untuk fluida *Non-Newtonian* , antara lain :

1. *Bingham plastic*

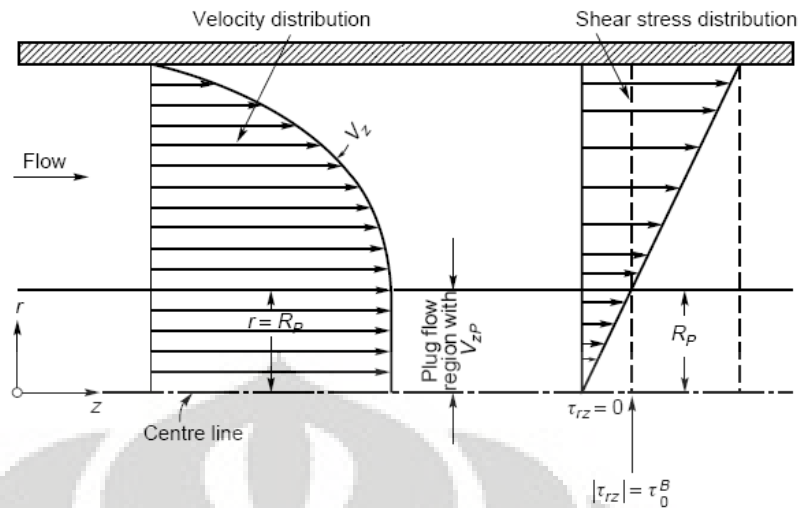
Bingham plastic adalah suatu model pendekatan fluida *Non-Newtonian* dimana viskositasnya sangat bergantung pada shear stress dari fluida tersebut, dimana semakin lama viskositasnya akan menjadi konstan. Persamaan untuk model ini sebagai berikut :

$$\tau = \tau_y + \mu_p \frac{\partial u}{\partial y} \quad (2.2)$$

Dimana :

$$\tau < \tau_y = \text{zat padat}$$

$$\tau > \tau_y = \text{fluida Newton}$$



Gambar 2.2 Distribusi Kecepatan *bingham plastic fluid* pada pipa

2. Pseudoplastis (plastis semu)

Pseudoplastis adalah suatu model pendekatan fluida *Non-Newtonian* dimana viskositasnya cenderung menurun tetapi *shear stress* dari fluida ini akan semakin meningkat, misalnya *vinil acetate/vinylpyrrolidone co-polymer* (PVP/PA). Persamaan untuk model ini sebagai berikut :

$$\tau = K \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n, n < 1 \quad (2.3)$$

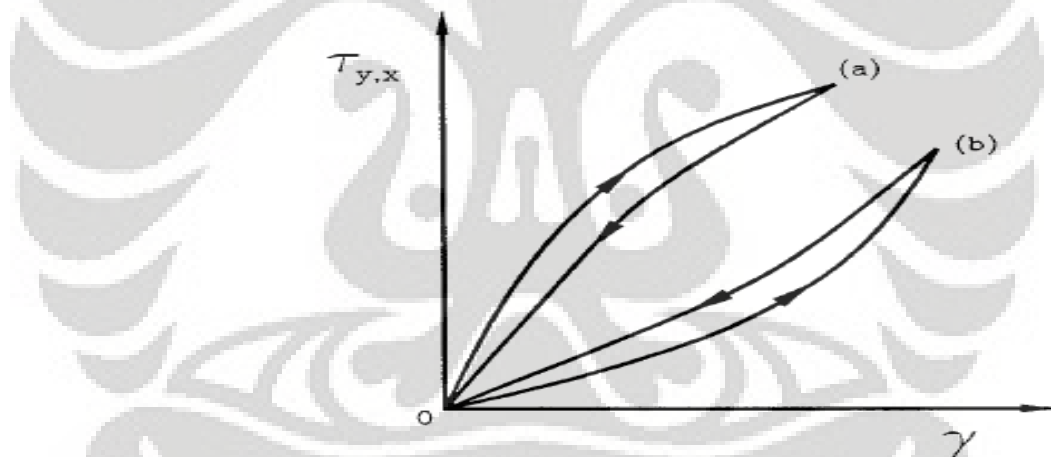
3. Dilatan

Dilatan adalah suatu model pendekatan fluida *Non-Newtonian* dimana viskositas dan *shear stress* dari fluida ini akan cenderung mengalami peningkatan, misalnya pasta. Persamaan untuk model ini sebagai berikut :

$$\tau = K \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n, n > 1 \quad (2.4)$$

4. Penggolongan lain

- *Thixotropic (shear thinning)*, fluida dimana viskositasnya berubah tergantung pada waktu dimana seolah-olah semakin lama semakin berkurang meskipun laju gesernya tetap. Apabila terdapat gaya yang bekerja pada fluida ini maka viskositasnya akan menurun, misalnya cat, campuran tanah liat (*clay*), dan berbagai jenis gel.
- *Rheopectic (shear thickening)*, fluida dimana viskositasnya berubah tergantung pada waktu dimana seolah-olah semakin lama semakin besar, misalnya minyak pelumas dimana viskositasnya akan bertambah besar saat minyak pelumas tersebut mengalami guncangan. Dalam hal ini fluida rheopectic jika ada suatu gaya yang akan bekerja padanya maka viskositasnya akan bertambah.



Gambar 2.3 Hubungan *shear stress* (τ) - *shear rate* (γ) pada *thixotropic* (a) dan *rheopectic* (b) yang tergantung pada waktu

Pada fluida *Non-Newtonian* secara umum hubungan tegangan geser (*shear stress*) dan gradient kecepatan (*shear rate*) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\tau = K \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^n = K(\gamma)^n \quad (2.5)$$

Dimana :

K = Indeks konsistensi

τ = Tegangan geser

n = Indeks perilaku aliran (*power law index*)

γ = Laju aliran

Dengan :

$$\tau = \frac{D\Delta P}{4L} \quad (2.6)$$

$$\gamma = \frac{8V}{D} \quad (2.7)$$

c. Power Law Index

Dari nilai tegangan geser (*shear stress*) dan laju aliran dari fluida tersebut maka *power law index* (n) dapat diketahui dengan persamaan sebagai berikut :

$$n = \frac{d \ln \frac{D\Delta P}{4L}}{d \ln \frac{8V}{D}} \quad (2.8)$$

atau

$$n = \frac{\text{Log} \frac{\tau_1}{\tau_2}}{\text{Log} \frac{\gamma_1}{\gamma_2}} \quad (2.9)$$

Dengan mengetahui besar tegangan geser yang terjadi, profil kecepatannya, dan *power law index* (n) maka nilai K (η) dapat diketahui dengan menggunakan persamaan (2.5). jika nilai K sudah diketahui

maka *Generalized Reynolds Number* dapat diketahui dengan menggunakan persamaan berikut :

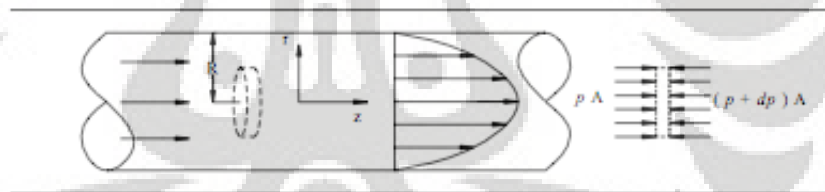
$$\text{Re}^* = \frac{\rho_m D_h^n U^{2-n}}{\mu} \quad (2.10)$$

Dimana :

$$\mu = K 8^{n-1} \quad (2.11)$$

Friction losses / friction factor (f) dipengaruhi oleh kecepatan, karena distribusi kecepatan pada aliran laminar dan aliran turbulen berbeda, maka koefisien gesek akan berbeda pula untuk masing-masing jenis aliran.

Pada aliran Laminar dalam pipa tertutup (*closed conduits*) mempunyai distribusi vektor kecepatan seperti pada gambar (1). Pada aliran laminar vektor kecepatan yang berlaku adalah kecepatan dalam arah z saja.



Gambar 2.4 Distribusi Tegangan Aliran Laminar dalam Pipa Bulat

Berikut adalah persamaan Hagen-Poiseuille dan berlaku untuk aliran laminar:

$$f = \frac{64}{VD\rho/\mu} = \frac{64}{\text{Re}} \quad (2.12)$$

Untuk aliran turbulen, persamaan *friction factor* yang dapat didapat berasal dari persamaan empiris Blasius,

$$f = 0.316 \text{Re}^{-\frac{1}{4}} \quad (2.13)$$

2.1.2 Aliran Fluida

Dalam suatu aliran yang melewati sistem atau instalasi pipa maka terjadi suatu hambatan aliran, hambatan tersebut disebabkan oleh faktor-faktor bentuk instalasi. Hambatan tersebut dapat menyebabkan turunnya energi dari fluida tersebut yang sering disebut dengan kerugian tinggi tekanan (*head loss*) atau penurunan tekanan (*pressure drop*) yang disebabkan oleh pengaruh gesekan fluida (*friction losses*) dan perubahan pola aliran terjadi karena fluida harus mengikuti bentuk dari dindingnya.

Berdasarkan pengujian yang dilakukan oleh HGL.Hagen (1839) penurunan tekanan berubah secara linier dengan kecepatan sampai kira-kira 0,3 m/s. namun, diatas sekitar 0,66 m/s penurunan tekanan hampir sebanding dengan kecepatan kuadrat kecepatan ($\Delta P \approx V^{1.75}$). Pada tahun 1883 Osborne Reynolds menunjukkan bahwa penurunan tekanan tergantung pada parameter : kerapatan (ρ), kecepatan aliran (V), diameter (D), dan viskositas absolut (μ) yang selanjutnya dikenal dengan bilangan Reynolds, penurunan tekanan merupakan fungsi dari faktor gesekan (λ) dan kekerasan relatif dari dinding pada (ϵ/D) [4], jadi :

$$\lambda = f\left(\text{Re}, \epsilon/D\right) \quad (2.14)$$

Menurut Henry Darcy (1857) yang melakukan eksperimen aliran dalam pipa menyatakan kekerasan mempunyai efek sehingga didapatkan faktor gesekan darcy (λ) atau disebut dengan formulasi Darcy-Weisbach sebagai berikut :

$$hf = \frac{\lambda L}{D(V^2 / 2g)} \quad (2.15)$$

Dari persamaan di atas didapat beberapa bentuk fungsi dari (λ) atau (f). Persamaan fanning umumnya digunakan untuk menghitung faktor gesekan dimana zat kimia penyusunnya lebih diperhatikan (untuk fluida lebih dari satu fase). Nilai faktor gesekan dapat dikonversi ke formula Darcy menjadi sebagai berikut :

$$[f_{Darcy} = 4 \times f_{fanning}] \quad (2.16)$$

Pada pola aliran dalam pipa horizontal terdapat efek gravitasi dimana fluida yang lebih berat akan berada dibagian bawah dan yang lebih ringan berada di atas, hal ini dimungkinkan karena perbedaan berat jenis dari fluida tersebut. Bentuk lain dari pola ini dapat berubah karena efek ini dimana aliran akan terbagi menjadi dua lapisan.

Pada pipa juga terjadi kerugian head pada aliran yang disebut *minor losses*. Dimana kerugian ini terjadi pada siku, sambungan, katup, belokan yang disebabkan oleh pembesaran mendadak yang menyebabkan terjadinya perbedaan kecepatan dan tekanan sehingga terjadi *losses* pada system pipa.

2.1.3 Sifat-sifat Fluida

Ada beberapa sifat fluida yang perlu diketahui, antara lain :

a. *Density*

Density adalah jumlah zat yang terkandung di dalam suatu unit volume. Semua fluida memiliki sifat ini. Sifat ini terbagi menjadi tiga bentuk, yaitu :

1. Densitas massa

Densitas massa adalah perbandingan jumlah massa dan jumlah volume dengan persamaan sebagai berikut :

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2.17)$$

Dimana m adalah massa dan v adalah volume dengan unit density adalah kg/m^3 dan dengan dimensi ML^{-3} dimana standar tekanan $P = 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ dan temperature $T = 288.15 \text{ K}$, misalnya $\rho \text{ air} = 1000 \text{ kg/m}^3$.

2. Berat spesifik

Berat spesifik adalah nilai densitas massa dikalikan dengan gravitasi dengan persamaan sebagai berikut :

$$\gamma = \rho g \quad (2.18)$$

Dimana unit berat spesifik adalah N/m^3 dan dengan dimensi $ML^{-3}T^{-2}$ dengan nilai γ air adalah $9.81 \times 10^3 N/m^3$.

3. Densitas relatif

Densitas relative atau spesifik gravity (s.g) adalah perbandingan antara densitas massa dengan berat spesifik suatu zat terhadap densitas massa atau berat spesifik dari suatu zat standar, dimana yang dianggap memiliki nilai zat standar adalah air pada temperature $4^{\circ}C$ dimana densitas relative tidak memiliki satuan.

b. Viskositas

Viskositas (kekentalan) adalah ukuran ketahanan fluida terhadap tegangan geser pada dinding dimana fluida tersebut mengalir. Hukum viskositas pada fluida Newtonian menyatakan bahwa laju aliran dikalikan dengan viskositas berbanding lurus terhadap tegangan geser.

Pada dasarnya viskositas disebabkan karena kohesi dan pertukaran momentum molekuler diantara lapisan layer fluida pada saat fluida tersebut mengalir. Viskositas fluida ini dipengaruhi oleh banyak hal, misalnya temperature, konsentrasi larutan, bentuk partikel, dll. Viskositas dinyatakan dalam dua bentuk, antara lain :

1. Viskositas dinamik

Viskositas dinamik adalah perbandingan tegangan geser dengan laju perubahannya, besar nilai viskositas dinamik tergantung dari faktor seperti yang dijelaskan sebelumnya. Untuk viskositas dinamik air pada temperature lingkungan $T = 27^{\circ}C$ adalah $8.6 \times 10^{-4} kg/ms$.

2. Viskositas kinematik

Viskositas kinematik adalah perbandingan viskositas dinamik terhadap density (kerapatan) massa jenis dari fluida tersebut.

Viskositas ini terdapat dalam beberapa penerapan antara lain dalam bilangan Reynolds yang merupakan bilangan tak berdimensi. Nilai viskositas kinematik air pada temperature standar $T = 27^{\circ}\text{C}$ adalah $8.7 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$.

Pada fluida Non-Newtonian viskositasnya ditentukan oleh *Apperant Viscosity* (kekentalan sesaat) karena fluida *Non-Newtonian* tersebut memiliki suatu sifat histerisis, hal ini disebabkan sulitnya mencari viskositas aslinya.

c. Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds adalah bilangan yang tak berdimensi yang menyatakan perbandingan gaya-gaya inersia terhadap gaya-gaya kekentalan (viskos) pada pipa bulat dengan aliran penuh sehingga berlaku persamaan sebagai berikut :

$$\text{Re} = \frac{Vd\rho}{\mu} = \frac{Vd}{\nu} \quad (2.19)$$

Dimana :

V = Kecepatan rata-rata aliran [m/s]

d = Diameter dalam pipa [m]

ν = viskositas kinematik fluida [m^2/s]

μ = viskositas dinamik fluida [kg/ms]

Aliran dalam pipa yang berbentuk lingkaran terbagi menjadi dua bagian, yaitu aliran laminar dan aliran turbulent. Karakteristik kedua aliran tersebut berbeda dari segi kecepatan, debit dan massa jenisnya.

Aliran laminar adalah aliran diaman tidak terjadinya pencampuran antara satu layer aliran dengan layer yang lain pada suatu fluida saat fluida tersebut dialirkan. Oleh karena itu, kecepatan aliran ini lambat sehingga kerugian berbanding lurus dengan kecepatan rata-rata. Sedangkan aliran turbulent adalah aliran dimana layer-layer batas aliran telah bercampur saat fluida tersebut mengalir. Kecepatan aliran ini lebih

tinggi dari aliran laminar dimana kerugian yang ditimbulkan sebanding dengan kuadrat kecepatan.

Bilangan Reynolds pada fluida *Non-Newtonian* adalah regenratif Reynolds (Re^*) hal ini disebabkan karena nilai viskositas dari fluida ini merupakan *apparent viscosity* atau kekentalan sesaatnya.

2.1.4 Persamaan Fluida

a. Laju Aliran Volume

Laju aliran volume disebut juga debit aliran (Q) yaitu jumlah volume aliran per satuan waktu. Debit aliran dapat dituliskan pada persamaan sebagai berikut :

$$Q = A V \quad (2.20)$$

Dimana :

V = Kecepatan aliran [m/s]

A = Luas penampang pipa [m]

Q = Debit aliran [m²/s]

μ = viskositas dinamik fluida [kg/ms]

Selain persamaan di atas dapat juga menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$Q = \frac{v}{t} \quad (2.21)$$

Dimana :

v = Volume aliran [m³]

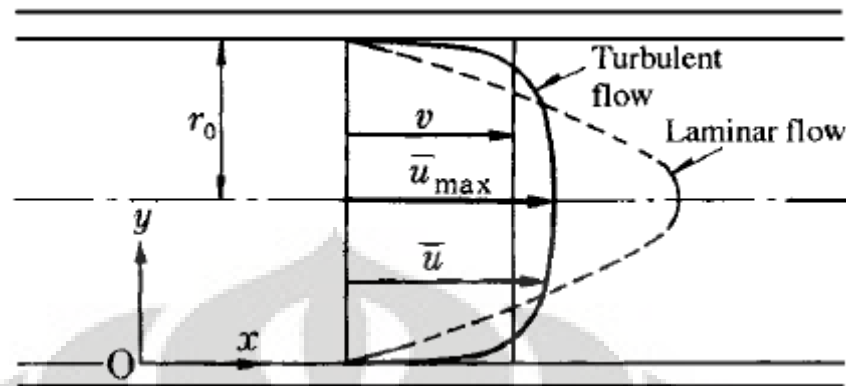
Q = Debit aliran [m²/s]

t = waktu aliran [s]

b. Distribusi Kecepatan

Distribusi kecepatan adalah distribusi aliran dalam pipa antara jarak aliran terhadap permukaan pipa. Distribusi aliran ini berbeda antara

aliran laminar dan aliran turbulente. Distribusi aliran digunakan untuk melihat profil aliran kecepatan dalam pipa.



Gambar 2.5 Distribusi Kecepatan *laminar dan turbulente* pada pipa bulat

Untuk aliran laminar maka berlaku persamaan sebagai berikut :

$$V = \frac{1}{2} v_c \quad (2.22)$$

$$v = v_c \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) = v_c \left(1 - \frac{(R-y)^2}{R^2} \right) \quad (2.23)$$

Dimana :

V = Kecepatan rata-rata aliran [m/s]

v_c = Kecepatan aliran pada pusat pipa [m/s]

v = Kecepatan aliran dalam jarak r atau y waktu aliran [m/s]

r = Jarak kecepatan aliran v dari titik pusat diameter dalam pipa [m]

y = Jarak kecepatan aliran v dari permukaan dalam pipa [m]

R = Jari-jari pipa [m]

Untuk aliran turbulente, rasio distribusi kecepatannya antara kecepatan di titik y , u_y , dengan kecepatan maksimum pada sumbu, u_m adalah :

$$v = v_c \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{6}} \quad (2.24)$$

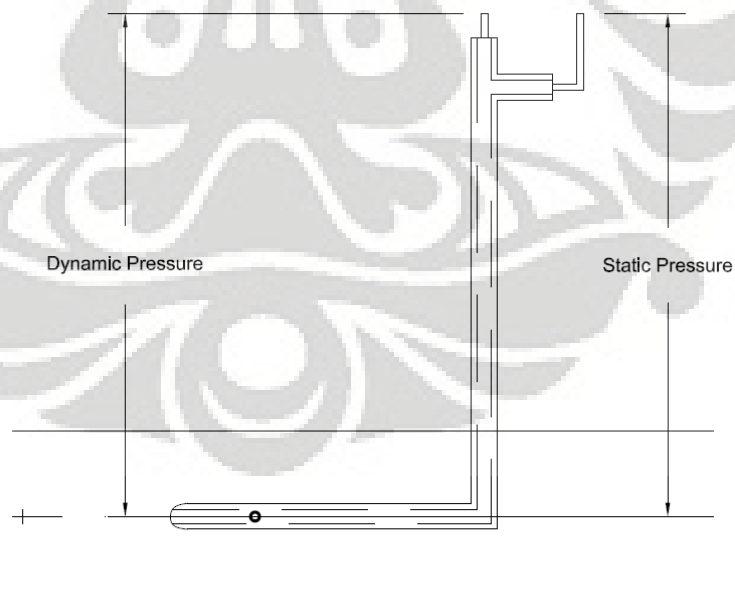
Dimana :

v_c = Kecepatan aliran pada pusat pipa atau kecepatan maksimum [m/s]

v = Kecepatan aliran dalam jarak r atau y waktu aliran [m/s]

r = Jarak kecepatan aliran v dari titik pusat diameter dalam pipa [m]

R = Jari-jari pipa [m]



Gambar 2.6 Pengukuran perbedaan tekanan pada pitot tube

Untuk mengetahui distribusi kecepatan aliran pada pipa spiral lengkung pada setiap titik kedudukannya dengan menggunakan pitot tube dimana perbedaan tekanan antara statik dan dinamik didapat dengan mengukur perbedaan ketinggian kemudian dengan menggunakan persamaan :

$$\begin{aligned}
 P_{dynamic} - P_{static} &= \frac{1}{2} \rho v^2 \\
 \Delta P &= \frac{1}{2} \rho v^2 \\
 \rho g \Delta h &= \frac{1}{2} \rho v^2 \\
 v &= \sqrt{2g\Delta h}
 \end{aligned}
 \tag{2.25}$$

2.2 Nanofluida

2.2.1 Konsep Nanofluida

Perpindahan kalor adalah proses yang sangat penting di berbagai industri. Sudah menjadi sifatnya bahwa fluida konvensional yang digunakan untuk memindahkan kalor buang memiliki konduktivitas termal yang rendah. Hal ini menjadi keterbatasan industri untuk meningkatkan efisiensi.

Sudah lebih dari seabad lebih sejak Maxwell (1881), para peneliti dan insinyur terus berusaha mengatasi keterbatasan ini dengan mendispersikan partikel berukuran mili ataupun mikro ke dalam fluida. Tetapi, tetap saja partikel tersebut masih terlalu besar untuk dapat berkombinasi dengan fluida dalam meningkatkan konduktivitas termal secara signifikan. Lagipula, bila dialirkan ke dalam pipa kecil, fluida tersebut akan menyumbat alirannya.

Konsep dan kemunculan dari nanofluida sangat berkaitan erat dengan *trend* miniaturasi dan teknologi nano itu sendiri. Sebagai akibat dari meningkatnya persaingan global, maka banyak industri mengembangkan fluida baru untuk menghantar kalor dimana

konduktivitas termalnya lebih baik dibanding fluida biasa yang ada sekarang ini.

Seperti kita ketahui, pada temperatur ruang, logam dalam bentuk solid memiliki nilai konduktivitas termal yang lebih tinggi dibandingkan fluida. Sebagai contoh, kita dapat melihat Tabel 2.1, konduktivitas termal dari tembaga pada temperatur ruang adalah sekitar 3000 kali lebih besar dari minyak mesin, dan 700 kali lebih tinggi dari air. Dan konduktivitas termal cairan metalik lebih tinggi dari cairan non-metalik. Dari hal tersebut, dapat ditarik kesimpulan bahwa konduktivitas termal fluida dimana telah didispersikan partikel padatan metalik di dalamnya tentunya akan lebih baik dibandingkan fluida konvensional.

Tabel 2.1 Konduktivitas Termal dari Beberapa Material

Jenis Material	Contoh Material	Nilai k (W/m.K) ^a
Padatan Metalik	Perak	429
	Tembaga	401
	Aluminium	237
Padatan Non-Metalik	Intan	3300
	Carbon	3000
	Nanotubes	
	Silikon	148
Cairan Metalik	Alumina (Al ₂ O ₃)	40
	Sodium pada 644K	72.3
Cairan Non-Metalik	Air	0.613
	Ethylene Glycol	0.253
	Minyak mesin	0.145

^aPada temperatur 300 K

[Sumber: Das, S.K. et al., 2008]

2.2.2 Perkembangan Nanofluida

Proses pemanasan atau pendinginan fluida sering digunakan dan merupakan kebutuhan utama dalam industri, energy, transportasi serta bidang elektronika. Sifat termal dari fluida kerja memegang peran penting dalam upaya efisiensi energi dalam upaya efisiensi energi pada peralatan perpindahan kalor. Fluida pemindah kalor konvensional seperti air, *ethylene glycol*, dan minyak pelumas mesin secara umum, memiliki sifat perpindahan kalor yang lebih rendah jika kita bandingkan dengan benda padat penghantar kalor. Walaupun perkembangan dan riset terdahulu telah dilakukan, kebanyakan dari penelitian berfokus pada persyaratan

perpindahan kalor pada industri, sementara peningkatan utama dalam kemampuan perpindahan kalor dari fluida sangat kurang. Sebagai akibatnya, suatu usaha dibutuhkan untuk mengembangkan suatu strategi baru untuk meningkatkan efisiensi perpindahan kalor dari fluida konvensional tersebut.

Perkembangan nano teknologi dewasa ini telah mengarah pada kelas fluida baru dan agak khusus, disebut nanofluida, yang memiliki potensi besar untuk aplikasi pada alat-alat perpindahan kalor. istilah nanofluida berarti dua campuran fase dimana fase kontinu biasanya cairan dan fase yang terdispersi terdiri dari nanopartikel padat yang sangat halus, berukuran umumnya lebih kecil dari 100 nm. Nanopartikel yang didispersikan pada fluida dengan jumlah yang relatif sedikit dan terdispersi secara merata akan meningkatkan *thermal properties* dari fluida dasar yang digunakan.

Choi (1995) merupakan orang yang pertama kali menggunakan istilah nanofluida dan menggunakan fluida cair dengan nanopartikel tersuspensi didalamnya. Setelah Choi memperkenalkan nanofluida ini, banyak dari *scientist* dan *engineer* yang meneliti dan mengembakan potensi yang dimiliki nanofluida ini. Perkembangan yang dilakukan bukan hanya dengan meneliti sifat- sifat nanofluida tetapi juga mengembangkan peratan yang dapat menggunakan nanofluida sebagai fluida kerja atau dapat disebut sebagai *next generation coolant* seperti *smart coolant* untuk komputer dan *safe coolant* untuk reaktor nuklir.

Dengan ukurannya yang begitu kecil, maka nanopartikel memiliki keistimewaan seperti:

- a. Mampu tersuspensi lebih lama dalam fluida dibanding mikropartikel dan jika ditambahkan dengan surfactants atau stabilizer, maka mampu suspensinya akan dapat bertahan terus menerus.
- b. Luas permukaan per unit volum dari nanopartikel sekitar 1000 kali lebih tinggi daripada mikropartikel, artinya pelepasan kalor menjadi lebih cepat karena $A_{\text{nanopartikel}} > A_{\text{mikropartikel}}$

Tabel 2.2 Perbandingan antara Mikropartikel dengan Nanopartikel

Segi	Mikropartikel	Nanopartikel
Stabilitas	Cepat mengendap	Hampir stabil
Rasio A/V	1	1000 kali lebih besar
Konduktivitas	Rendah	Tinggi
Menyumbat dalam pipa mikro?	Ya	Tidak
Erosi?	Ya	Tidak
Daya pemompaan	Besar	Kecil
Fenomena skala nano?	Tidak	Ya

[Sumber: Das, S.K. et al., 2008]

2.2.2.1 Konduktivitas Termal Nanofluida sebagai Fungsi Ukuran Partikel

Partikel CuO dan Al₂O₃ berukuran nanometer dicampur dengan fluida cair diantaranya air dan *ethyleneglycol*. Dari hasil penelitian diperoleh peningkatan termal konduktivitas sebesar 20%. Peningkatan konduktivitas termal sekitar 60% dapat dicapai untuk nanofluida terdiri dari air dan volume 5% nanopartikel CuO peningkatan termal konduktivitas sebesar 40% untuk penambahan 0.3% partikel Cu dalam *ethyleneglycil* (Eastman, J.A. et al., 1997). Xuan dan Li (2000), menjelaskan suatu prosedur untuk menyiapkan nanofluida dengan menggunakan peralatan *hot wire* untuk mengukur konduktivitas termal nanofluida dengan nanopartikel bubuk tembaga yang tersuspensi. Pertama mereka menemukan bahwa kenaikan termal konduktivitas adalah linier dan mereka menjadikan penelitian Hamilton-Crosser (1962) sebagai perbandingannya. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa konduktivitas termal baik nanofluida air dan *ethyleneglycol* jauh lebih besar dari yang sudah diperkirakan oleh Hamilton- Crosser. Kesimpulan dari eksperimen mengejutkan karena sangat jauh berbeda untuk nanofluida Al₂O₃. Untuk diingat bahwa termal konduktivitas dari Al₂O₃ dan CuO tidak jauh berbeda, dan rata-rata ukuran partikel Al₂O₃ sebesar 38nm dan CuO

sebesar 24nm. Kesimpulan yang diambil mengarahkan pada perbedaan ukuran yang terdapat antara keduanya.

Teori klasik tentang konduktivitas termal fluida dengan partikel solid yang tersuspensi di dalamnya berasal dari Maxwell (1881), yang mengasumsikan bentuk partikel homogen berbentuk bulat. Teori ini kemudian dimodifikasi untuk partikel tidak bulat oleh R.L.Hamilton dan O.K Crosser (1961) untuk rasio konduktivitas termal material padat terhadap air lebih dari 100. Persamaan tersebut dinyatakan dalam bentuk :

$$k_{eff} = k_o \frac{k_p + (n-1)k_o - (n-1)\varepsilon(k_o - k_p)}{k_p + (n-1)k_o + \varepsilon(k_o + k_p)} \quad (2.26)$$

Dimana k_{eff} konduktivitas efektif dari nanofluida, k_p konduktivitas partikel, k_o konduktivitas fluida dasar, ε merupakan fraksi volume dari partikel dan n factor bentuk dari partikel:

$$n = \frac{3}{\psi} \quad (2.27)$$

Dimana kebulatan dari partikel.berdasarkan model ini, merekamembandingkan eksperimen mereka, dimana menunjukkan kesesuaian dengan model untuk nanofluida Al_2O_3 pada air dan *ethyleneglycol*.

Hasil yang didapat menunjukkan bahwa konduktivitas termal baik nanofluida air dan *ethyleneglycol* jauh lebih besar dari yang sudah diperkirakkan oleh Hamilton-Crosser.

Kemudian dikonfirmasi kembali oleh Wasp (1977) sebagai ekspresi alternative untuk menghitung konduktivitas termal efektif campuran padat-cair. Persamaan tersebut ditulis sebagai berikut :

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \phi(k_f - k_p)} \quad (2.28)$$

Dengan ϕ fraksi volum didefinisikan sebagai :

$$\phi = \frac{V_p}{V_f + V_p} = m \frac{\pi}{6} d^3 \quad (2.29)$$

Dengan m adalah jumlah partikel per unit volum dan d merupakan diameter rata- rata partikel.

Saat ini rumus yang ada untuk menentukan konduktivitas termal suatu fluida yang partikel terdispersinya berukuran sangat kecil adalah persamaan *Hamilton-Crosser* dinyatakan dalam bentuk sebagai berikut :

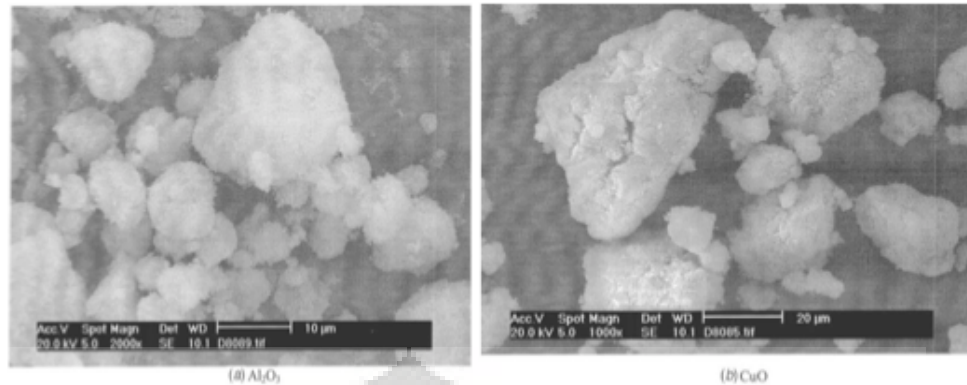
$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k + 2 - 2\phi(1 - k)}{k + 2 + \phi(1 - k)} \quad (2.30)$$

Dengan k adalah rasio perbandingan antara konduktivitas kalor partikel solid terhadap konduktivitas kalor fluida dasarnya $k = k_p/k_f$.

2.2.2.2 Konduktivitas Termal Nanofluida sebagai Fungsi Temperatur

Lebih lanjut Das, S.K. et al. (2003), melakukan pengukuran diffusifitas termal dan konduktivitas termal pada nanofluida dengan nanopartikel CuO dan Al₂O₃ sebagai bahan suspensinya sebagai fungsi temperatur. Pernyataan ini menjadi titik awal pekerjaan yang menunjukkan dengan jelas tentang pernyataan Lee, et al. (1999), mereka menemukan kesamaan karakteristik Al₂O₃ yang dijelaskan oleh Hamilton-Crosser (1962), karena perbedaan besar partikel antara Al₂O₃ dan CuO memberikan dorongan kepada Das, S.K. et al. (2003) untuk berfikir bahwa ada hubungan temperatur dengan ukuran partikel yang menyebabkan pergerakan partikel yang menunjukkan *nanobehavior*. Cara satu-satunya untuk menegaskan hipotesis ini yaitu dengan mengadakan perhitungan dengan menggunakan temperatur yang berbeda.

Mereka menggunakan teknik *transient temperature oscillation* untuk menunjukkan bahwa eksperimen dilakukan dengan menggunakan partikel yang sama dengan Lee et al. (1999). Partikel yang didispersikan dengan *ultrasonic vibration* ditunjukkan pada gambar 3. Mereka menghitung konduktivitas termal pada temperature antara 21 dan 55 °C.



Gambar 2.7 Foto TEM dari Penggumpala Bubuk Nano Partikel
[Sumber: Das, S.K. et al., 2008]

2.2.3 Mengukur Konduktivitas Termal pada Cairan

Konduktivitas termal merupakan salah satu faktor terpenting dalam perpindahan panas, dan nanofluid menjadi unggul dalam perpindahan panas karena memiliki konduktivitas termal lebih besar dari fluida biasa. Hal ini dapat diketahui setelah dilakukan percobaan terhadap berbagai kombinasi dari fluida dan nano partikel. Berikut ini akan dijelaskan dua metode yang umum digunakan dalam pengukuran konduktivitas termal, yaitu *temperature oscillation methods* dan *transient methods*.

Sebenarnya terdapat satu metode lagi dalam pengukuran konduktivitas termal, yaitu *steady-state methods*, tetapi *steady-state methods* terdapat beberapa kelemahan seperti panas yang hilang tidak dapat diketahui, tingkat akurasi tidak menentu, dan adanya konveksi natural yang akan mempengaruhi nilai konduktivitas. Hal ini membuat *steady-state methods* tidak umum digunakan dalam pengukuran konduktivitas termal. Sehingga untuk lebih akurat dalam mengukur konduktivitas termal lebih baik menggunakan *transient methods* yang akan dijelaskan lebih lanjut lagi.

2.2.3.1 *Transient Hot-Wire Method* (Das, S.K. et al., 2008)

Metode ini merupakan metode yang paling umum digunakan. Dalam metode ini kawat metal yang tipis digunakan sebagai sumber panas dan sensor temperatur. Kawat tersebut kemudian ditaruh di dalam fluida yang akan diukur konduktivitas termalnya. Lalu arus listrik dialirkan ke

kabel untuk memanaskan fluida. Lalu semakin tinggi konduktivitas termal dari fluida tersebut maka akan semakin rendah kenaikan suhu dari kawat metal tersebut. Percobaan ini dilakukan dalam jangka waktu antara 2 – 8 detik, karena waktu percobaan sangat cepat maka konveksi natural tidak sempat terjadi. Lalu dengan adanya alat elektronik yang lebih presisi untuk melakukan percobaan ini maka data yang didapatkan akan lebih akurat.

Metode ini disebut transient karena kalor diberikan seketika pada saat kawat mendapatkan kalor. Persamaan dari metode ini menggunakan *specific solution* dari *Fourier's Law* untuk *radial transient heat conduction*.

Untuk persamaan konduksi kalor pada koordinat Cartesian adalah :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.31)$$

Lalu dengan mengintegrasikan persamaan di atas pada sisi z maka akan didapatkan persamaan distribusi temperatur seperti berikut :

$$T = \frac{q'}{4\pi k} \ln \frac{4kt}{r^2 \rho c_p} - \frac{\gamma q}{4\pi k} \quad (2.32)$$

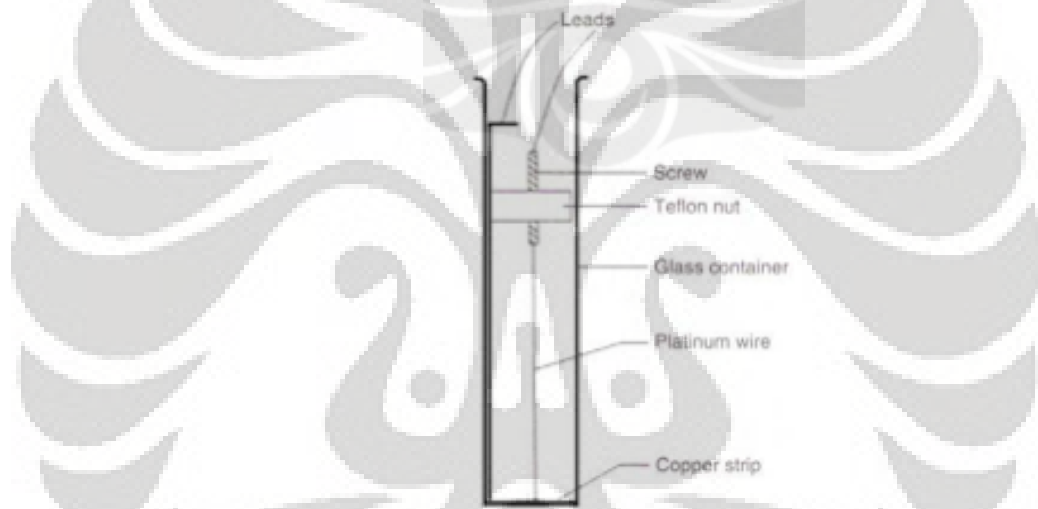
Dengan q adalah kalor yang diberikan per satuan waktu per satuan panjang dalam W/m dan k adalah nilai konduktivitas dari fluida dalam W/mK, dan jika temperatur pada saat waktu t_1 dan t_2 bernilai T_1 dan T_2 , maka persamaannya menjadi :

$$k = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln \frac{t_2}{t_1} \quad (2.33)$$

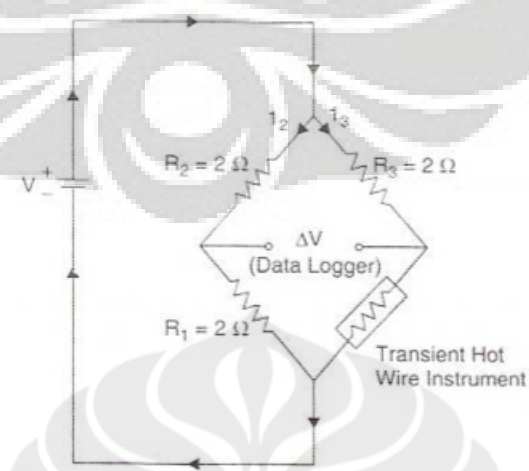
Bentuk dari alat percobaan akan ditunjukkan pada gambar 2.8, kawat diletakkan sepanjang sumbu axis, yang nantinya akan dikelilingi oleh fluida yang akan diukur konduktivitas termalnya. Karena kawat tersebut akan digunakan sebagai pemanas dan sensor temperatur maka biasanya digunakan kawat berbahan platinum. Platinum memiliki *electrical resistivity* sebesar $1.06 \times 10^{-7} \Omega\text{m}$ (pada temperatur 20°C) yang

lebih besar dari metal lainnya, dan mempunyai *temperature coefficient of resistance* sebesar $0.0003925 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ (untuk platinum murni) yang juga lebih besar dari metal lainnya. Lalu karena kawat tersebut akan digunakan sebagai sumber panas, maka diameter yang digunakan sekitar $100 \text{ }\mu\text{m}$.

Karena Percobaan ini hanya berlangsung sekitar 2 – 8 detik maka jumlah kalor yang mengalir ke fluida sangat kecil (maksimum 0.75 J), maka besar diameter dari wadah tidak boleh terlalu besar, sehingga data yang diambil menjadi akurat. Kawat tersebut kemudian disambungkan ke *cooper screw* menjadi satu dan *cooper string* pada ujung yang satunya. Baik *screw* maupun *string* yang disambungkan harus cukup tebal sehingga *electrical resistance* menjadi kecil.

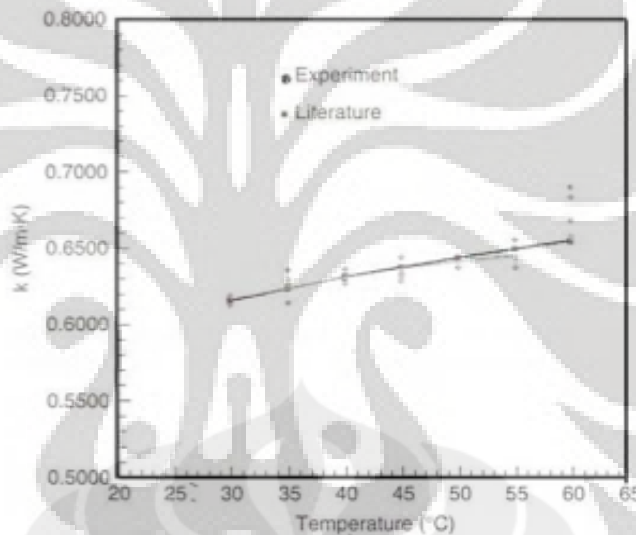


Gambar 2.8 Alat *Transient Hot Wire*



Gambar 2.9 Sirkuit Elektrik dari Alat *Transient Hot Wire*

Sirkuit elektrik dari alat percobaan ini dibuat menjadi jembatan *wheatstone* (Gambar 2.9) karena kawat akan digunakan sebagai sumber panas dan sensor temperatur. Variable *voltage source* digunakan sebagai sumber listrik. Lalu sirkuit elektrik tersebut dihubungkan ke *data acquisition system* yang dihubungkan ke komputer, yang akan menampilkan data-data yang didapatkan dari percobaan seperti besar resistor, tegangan yang diberikan, beda tegangan di sepanjang jembatan, waktu, dan temperatur. Data-data tersebut kemudian diolah menggunakan persamaan yang telah disebutkan sebelumnya untuk mendapatkan nilai konduktivitas termal dari fluida tersebut.

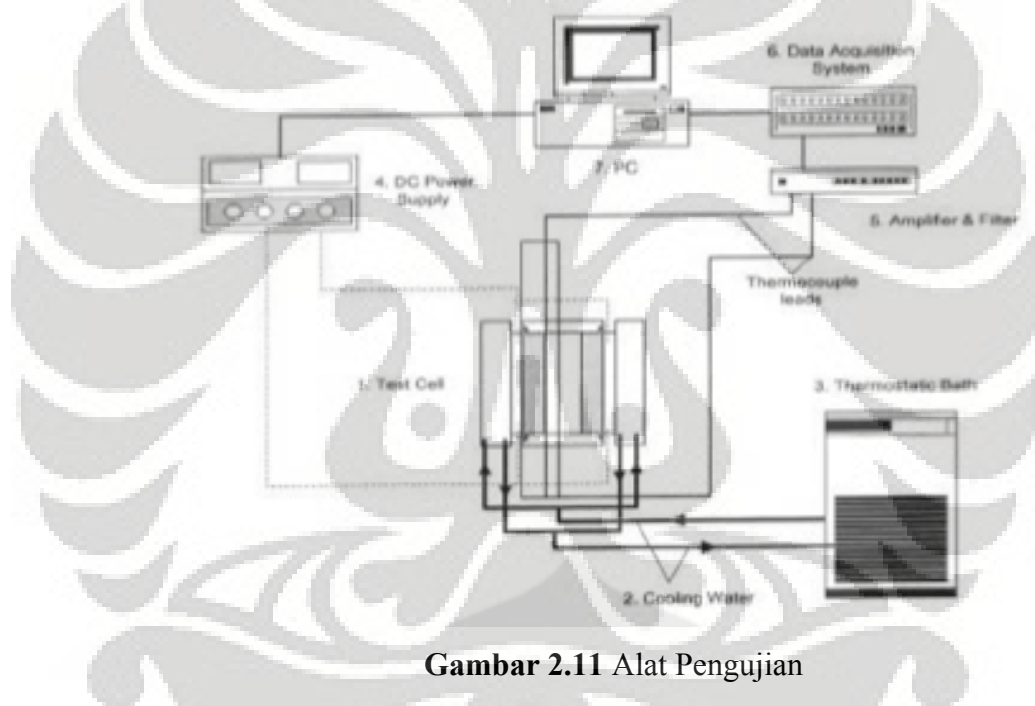


Gambar 2.10 Akurasi Pengukuran dari *Transient Hot Wire*

2.2.3.2 *Temperature Oscillation Method* (Das, S.K. et al., 2008)

Prinsip dasar dari percobaan ini adalah menunjukkan osilasi temperatur di dalam *cylindrical liquid volume*. Pengukuran dari konduktivitas termal didasarkan pada persamaan energi untuk konduksi. Persamaan tersebut diterapkan dengan asumsi fluida yang diuji isotropic dan *thermophysical properties* seragam dan konstan terhadap waktu di seluruh bagian specimen. Dan pada saat pengujian fluida yang akan diuji diapit oleh dua *reference layer*, yang nantinya akan dihitung osilasi temperaturnya untuk menghitung konduktivitas termal dari fluida uji.

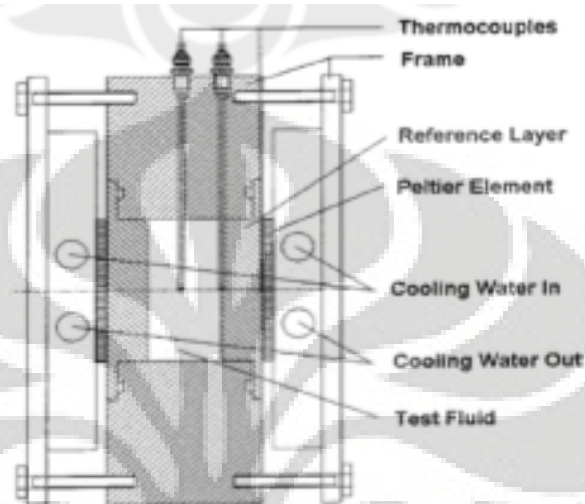
Susunan dari perangkat untuk melakukan uji ini antara lain *fabricated test cell* (1), yang akan didinginkan oleh *cooling water* (2) kedua ujungnya dihubungkan ke *thermostatic bath*. Untuk sumber listriknya diperlukan *DC power supply* (4) yang akan dihubungkan ke *elemen peltier* yang ada pada *test cell*. Temperatur dari fluida uji akan diterima oleh *thermocouples* di *test cell*, yang hasilnya akan diterima dan diteruskan oleh *amplifier* dan *filter* (5). Hasil dari *amplifier* dan *filter* diterima oleh *data acquisition system* (6) yang akan mengolah data lebih lanjut lagi dan ditampilkan ke komputer (7). Hasil dari temperatur fluida uji dipengaruhi oleh kontrol *cooling water* dari *thermostatic bath*.



Gambar 2.11 Alat Pengujian

Bentuk dari *test cell* adalah *flat cylindrical cell*, yang axisnya ditempatkan secara horisontal. Frame dari *cell* ini dibuat dari bahan poly (*oxymethylene*) yang akan berfungsi sebagai *layer* isolasi pertama. Bagian utama dari *test cell* terdiri dari lubang berukuran 40 mm yang akan diisi oleh fluida uji, dua plat diujungnya yang diapit oleh elemen peltier dan *water cooler*. Lubang pada bagian utama ini ditutup oleh *disk type reference material* berukuran diameter 40 mm dan tebal 15 mm di kedua sisinya. Ukuran dari tempat fluida uji berdiameter 40 mm dengan tebal 8 mm. Temperatur akan diukur di tiga tempat, yaitu di persinggungan antara

elemen peltier dan *reference layer*, persinggungan antara *reference layer* dan fluida uji, dan di tengah bidang axis dari fluida uji. Untuk itu digunakan Ni-CrNi *thermocouples* berdiameter 0.1 mm yang digunakan di tempat persinggungan dan yang berdiameter 0.5 mm yang digunakan di tengah bidang axis fluida uji.



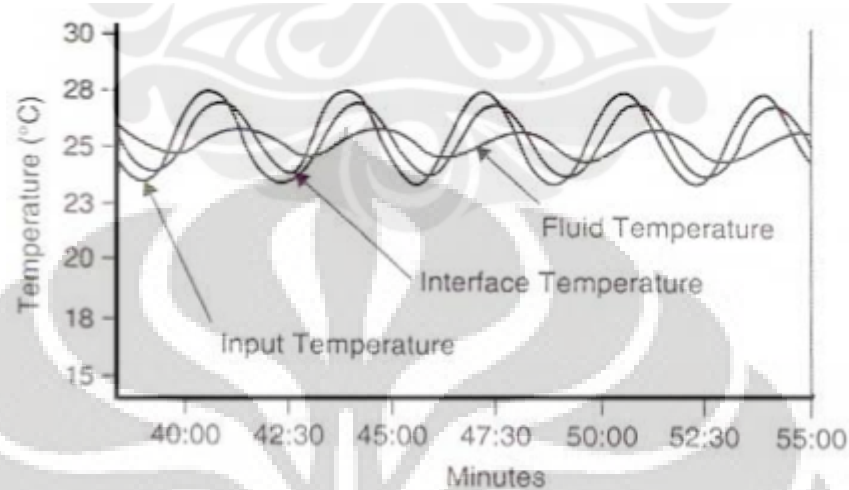
Gambar 2.12 Konstruksi dari *Test Cell*

Temperatur dari reference material diosilasi suhunya oleh *eleven* peltier berukuran 40 mm x 40 mm. Tujuan dari osilasi temperatur ini adalah :

- a. Amplitudo dari osilasi dijaga agar tetap kecil (± 1.5 K) sehingga properties dari fluida uji tidak berubah dan tidak terjadi *natural convection*. Amplitudo juga dijaga agar tidak turun terlalu jauh agar tingkat akurasi dari pengukuran tidak berubah. Nilai dari Grashof number adalah 850, yang nilainya di bawah batas *natural convection*.
- b. Amplitudo yang kecil dan pengaturan yang akurat dari rata-rata osilasi temperatur, menjamin test pada *conducting fluid* dilakukan pada temperatur yang diinginkan.

Sebagai contoh, sebuah osilasi temperatur direkam setelah *steady oscillation* tercapai. Pada contoh grafik ini terlihat bahwa osilasi temperatur yang dihasilkan oleh elemen peltier bentuknya berubah saat melewati reference material, dan menjadi berubah lebih banyak lagi ketika mencapai titik tengah dari fluida uji. Berdasarkan prinsip yang telah

dijelaskan sebelumnya, hasil ini memungkinkan untuk menghitung *thermal diffusivity* yang akurat dengan mengetahui amplitudo dari osilasi termal pada selubung (persinggungan fluida uji dengan reference material) sampai titik tengah fluida uji.



Gambar 2.13 Osilasi Temperatur yang dicatat oleh Das, S.K. et al. (2003)

Dengan cara ini juga densitas dari fluida uji dapat diukur dan *specific heat* dari fluida uji dapat dihitung dengan :

$$C_{p,nf} = \frac{m_s C_{p,s} + m_w C_{p,w}}{m_s + m_w} \quad (2.34)$$

Dan *thermal conductivity* dari fluida uji dapat dihitung dengan :

$$k_{nf} = \alpha_{nf} \rho_{nf} C_{p,nf} \quad (2.35)$$

2.2.4 Perpindahan Kalor Konveksi pada Nanofluida

Banyak penelitian yang telah membahas tentang termal konduktivitas pada nanofluida. Sedangkan untuk penelitian tentang perpindahan kalor konveksi ternyata masih sedikit dan sampai sekarangpun masih berlanjut. Putra, Nandy et al. (2003) membahas tentang konveksi bebas pada nanofluida didalam silinder horisontal yang dipanaskan pada satu ujung dan ujung lainnya didinginkan. Hasil yang didapat menunjukkan fluida ini berbeda karakter dari *slurry* pada umumnya. Dalam proses perpindahan kalor pendidihan, nanofluida juga diteliti, seperti

yang dilakukan oleh Das, S.K. et al. (2003) yaitu proses *pool boiling* dalam nanofluida air- Al_2O_3 dan mengindikasikan bahwa nanopartikel mempengaruhi karakteristik proses pendidihan fluida. sementara Xuan dan Quang Li (2003) juga melakukan percobaan untuk menyelidiki perpindahan kalor konveksi dan karakteristik aliran dari nanofluida didalam tabung. Peningkatan koefisien perpindahan kalor konveksi nanofluida seiring dengan laju aliran dan dan juga fraksi volume nanopartikel sementara koefisien perpindahan kalornya lebih besar dari fluida dasarnya (air) pada laju aliran yang sama.

Kemudian Gosselin, Louis et al. (2004), mengkombinasikan disipasi energi dan perpindahan kalor untuk mengoptimalkan aliran pada nanofluida. Penelitian dilakukan pada lapisan aliran turbulen dan laminar, dan sasarannya adalah untuk memaksimalkan perpindahan kalor yang lepas dari sebuah plat panas dengan nanofluida. Putra, Nandy et al. (2004) melakukan eksperimen perpindahan kalor konveksi paksa pada nanofluida dengan nanopartikel Al_2O_3 , pengukuran koefisien perpindahan kalor ini dengan menggunakan alat perpindahan kalor pipa ganda dalam susunan tipe aliran berlawanan. Hasil pengukuran menunjukkan peningkatan nilai koefisien konveksi untuk nanofluida konsentrasi 1% sebesar 6-10% dan konsentrasi 4% sebesar 7-17%. Hal ini juga pernah diprediksi oleh Nandy, dan diperkuat dengan penelitian lanjutannya yang menunjukkan peningkatan koefisien perpindahan kalor sebesar 6%-8% pada konsentrasi 1-4% dalam jangkauan temperature 40°C - 60°C .

Aliran suatu partikel padat dengan fluida biasa disebut dengan aliran partikulat (*particulate flow*). Nanopartikel sebagai partikel padat dalam nanofluida merupakan aliran partikulat sehingga akan terpengaruhi karakteristik-karakteristik aliran partikulat seperti,

- a. *Thermoporesis*, suatu partikel padat yang tersuspensikan dalam fluida akan mengalami gaya yang arahnya berlawanan dengan gradien kenaikan temperatur. Beberapa studi penelitiannya dilakukan oleh Talbot, dkk (1980), Yamamoto dan Ishihara (1988). Berikut adalah rumus gaya thermoporesis pada suatu partikel.

$$F_T = -D_T \frac{1}{m_p T} \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.36)$$

Dimana

$$D_T = \frac{6\pi\mu^2 C_s (K_r + 2.18K_r)}{\rho(1 + 3 \times 1.14K_r)(1 + 2K_r + 4.36K_r)} \quad (2.37)$$

D_T = koefisien difusi termoforik

K_r = rasio antara konduktivitas termal fluida dengan partikel

m_p = massa partikel

C_s = 1.17

μ = viskositas fluida

Tetapi rumus di atas dibangun berdasarkan suspensi partikel padat dalam gas ideal, tentunya perlu modifikasi bila digunakan dalam suspensi partikel padat dalam liquid seperti nanofluida.

- b. *Shear Lift Force*, gaya angkat partikel yang diakibatkan adanya gaya gesar pada suspensinya.

$$\vec{F} = \frac{2Kv^{1/2} \rho d_p}{\rho_p d_p (d_u d_u)^{1/4}} (\vec{v} - \vec{v}_p) \quad (2.38)$$

Dimana $K = 2.594$ dan d_{ij} adalah *deformation tensor*. Disebut juga *Saffman's Lift Force*.

- c. Gerak Brownian, sangat terkait erat dengan efek temperatur pada konduktivitas, dan diyakini bahwa konveksi yang terjadi akibat gerak Brownian yang dialami nanopartikel adalah alasan utama mengapa konduktivitas termal nanofluida begitu meningkatnya.
- d. Efek Soret dan Dufour, efek ini menjelaskan bahwa bila suatu campuran (mixture) diberikan suatu gradien temperatur, maka komponen-komponen dari mixture tersebut akan terpisah,

menghasilkan gradien konsentrasi yang lajunya sebanding dengan gradien temperatur.

2.2.4.1 Konveksi Paksa

Perpindahan kalor secara konveksi sangat terkait erat dengan viskositas dari fluida suspensinya. Berbicara mengenai viskositas nanofluida maka akan timbul pertanyaan. Apakah nanofluida merupakan fluida Newtonian atau yang terjadi hanyalah proses *shear thinning* tipis pada suspensinya.

Penelitian mengenai konveksi nanofluida pertama kali dilakukan oleh Pak dan Cho (1998), dengan objek nanopartikelnya adalah γ Al_2O_3 (13 nm) dan TiO_2 (27 nm) Hasil dari penelitian itu antara lain:

- a. Suspensi tersebut bersifat fluida Newtonian pada fraksi volum partikel yang sangat kecil, dan akan menunjukkan perilaku *shear thinning* (yaitu turunnya viskositas dengan laju gesernya) ketika fraksi volum partikelnya dinaikkan.
- b. Nanofluida γ Al_2O_3 basis air menunjukkan perilaku *shear thinning* pada volum partikel 3 %, sedangkan nanofluida TiO_2 menunjukkan *shear thinning* pada volum partikel 10 %.
- c. Kenaikan temperatur menyebabkan viskositas nanofluida akan menurun.
- d. Meningkatnya viskositas, tentunya akan menaikkan *pressure drop* akibat friksi. Dengan kata lain, kenaikan koefisien perpindahan kalor nanofluida akan disertai naiknya *pressure drop* friksi. Sehingga perlu penambahan *pumping power* agar dapat mengatasi *pressure drop* yang terjadi.
- e. *Pumping power* dengan kecepatan aliran yang konstan menyebabkan penurunan koefisien perpindahan kalor sebanyak 12 %.

Namun, Xuan dan Li (2003) mengemukakan hal yang berbeda, mereka menemukan bahwa dengan kecepatan yang sama yang dilakukan pada penelitian Pak dan Cho (1998), *pumping power* dengan kecepatan aliran konstan sebenarnya menyebabkan kenaikan koefisien perpindahan

kalor sebanyak 40 %. Mereka melihat bahwa bila fluida basisnya didesain dengan baik, maka sebenarnya kenaikan koefisien perpindahan kalor akan tercapai sesuai yang diinginkan. Pada penelitian Pak dan Cho, kenaikan viskositas yang besar menyebabkan turbulensi berkurang, dan pada akhirnya mengurangi *heat transfer*-nya. Xuan dan Li juga menyimpulkan bahwa penggunaan persamaan Dittus Boelter dengan modifikasi sesuai dengan nanofluidanya adalah tidak cukup tepat untuk menjelaskan konveksi pada nanofluida. Karena nanofluida tidak dapat dianggap sebagai fluida single, dan dalam nanofluida banyak efek-efek spesial yang terjadi seperti gravitasi, gerak Brownian, gaya *drag* pada partikel, dan difusi. Akhirnya, mereka mencoba membuat persamaan yang mengkorelasikan perpindahan kalor nanofluida dalam pipa seperti di bawah ini.

Untuk aliran laminar:

$$Nu = 0.4328(1 + 11.285\epsilon_p^{0.754} Pe_d^{0.218}) Re^{0.333} Pr^{0.4} \quad (2.39)$$

Untuk aliran turbulen:

$$Nu = 0.0059(1 + 7.6286\epsilon_p^{0.6886} Pe_d^{0.001}) Re^{0.9238} Pr^{0.4} \quad (2.40)$$

Dimana,

$$Pe_d = \frac{u_p d_p}{\alpha_p} \quad (2.41)$$

merupakan bilangan Peclet dari partikel. α_p adalah difusivitas termal dan ϵ_p adalah fraksi volum partikel.

Percobaan lainnya yaitu penelitian oleh Das, S.K. et al. (2003) yang mengukur viskositas NP-Al₂O₃ dengan basis air. Hasilnya menunjukkan viskositas adalah besaran yang independen terhadap laju geser (*shear rate*).

Percobaan-percobaan yang telah disebutkan di atas menunjukkan bahwa banyak variasi viskositas yang terjadi dalam nanofluida.

2.2.5 Pembuatan Nanofluida

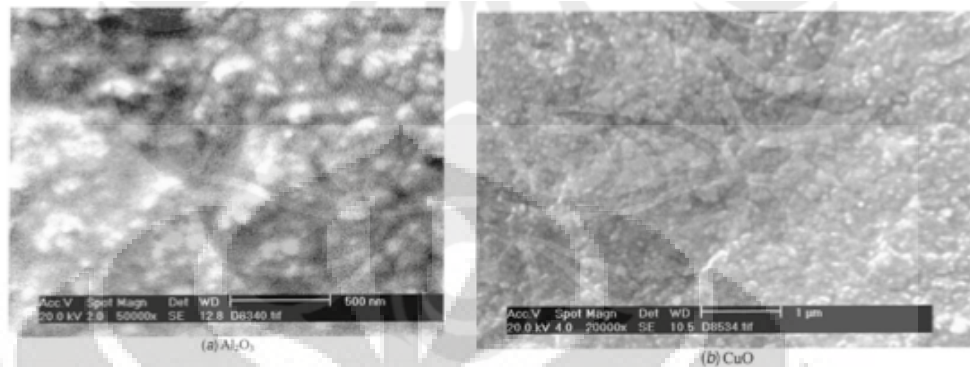
Partikel-partikel dalam ukuran nanometer pada fluida menyebabkan meningkatnya interaksi dan tumbukkan antara partikel, fluida dan permukaan yang dilaluinya, adanya fluktuasi pencampuran dan turbulensi dari fluida yang meningkat serta gradient temperature dari fluida yang mengecil. Partikel nano ini mengalami gerak Brownian sehingga ketika fluida dalam keadaan diam, partikel ini terdistribusi merata dengan gaya apung (*buoyancy*) sehingga tidak terjadi sedimentasi.

Dalam pencampuran nanopartikel pada fluida dasar, sangat sedikit literatur yang menjelaskannya. Penelitian-penelitian dari Laboratorium Nasional Argonne, menjelaskan ada dua teknik pencampuran nanofluida yaitu; teknik pertama dengan membuat nano partikel yang untuk kemudian mencampurkannya ke dalam fluida dasar secara bersamaan; dan teknik kedua, pembuatan nano partikel dan pencampuran partikel tersebut dilakukan terpisah. Akan tetapi kedua teknik tersebut memperoleh hasil yang baik hanya untuk partikel nano oksida dan tidak untuk partikel nano logam.

Untuk mencari hasil yang lebih baik Das, S.K. et al., melakukan pencampuran menggunakan *ultrasonic vibration* yang menghasilkan campuran dimana partikel nano dapat terdispersi dengan baik pada campuran. Dalam persiapannya nanofluida ini perlu diperhatikan densitas dari partikel nano untuk mendapatkan perbandingan campuran yang tepat. Putra, Nandy et al. (2002) melakukan pencampuran menggunakan *ultrasonic vibration* yang menghasilkan campuran yang partikel nanonya terdispersi dengan baik. Karakteristik yang terbentuk tergantung dengan fraksi volume dari partikel yang dicampurkan. Pada penelitian ini, digunakan konsentrasi volume sebesar 1% dan 4% nanopartikel Al_2O_3 berukuran kurang lebih 32 nm.

Pada penelitian-penelitian sebelumnya digunakan persentase volum untuk menentukan konsentrasi campuran. Volum partikel ditentukan dengan menggunakan densitas sebenarnya dari partikel nano dan massanya dengan mengabaikan massa udara yang tertangkap didalamnya.

Pencampuran partikel nano kedalam fluida dasar mengakibatkan pembentukan karakteristik baru terhadap fluida yang dihasilkan, karakteristik yang terbentuk tergantung dengan fraksi volume partikel yang dicampurkan.



Gambar 2.14 Foto TEM dari Nanopartikel yang Terdispersi
[Sumber: Das, S.K. et al., 2008]

Secara garis besar, untuk menghasilkan nanofluida, setidaknya ada 2 metode dasar yang dikembangkan, yakni:

- Metode *single step*, dimana proses pembuatan nanopartikel dan pendispersiannya ke dalam fluida dilakukan secara sekaligus dalam satu tahapan di dalam *base fluid*-nya
- Metode *two step*, dimana proses pembuatan nanopartikel dan pendispersiannya ke dalam fluida tidak dilakukan secara sekaligus dalam tempat yang sama (di *base fluid*-nya). Proses pembuatan nanopartikel dan proses pendispersiannya adalah proses yang terpisah.

Untuk nanopartikel, biasanya jenis-jenis material yang digunakan antara lain; Oksida keramik (Al_2O_3 , CuO), Nitrit keramik (AlN , SiN), Karbida keramik (SiC , TiC), Logam (Cu , Ag , Au), Semikonduktor (TiO_2 , SiC), Carbon Nanotubes, Material komposit ($\text{Al}_{70}\text{Cu}_{30}$).

Sedangkan untuk base fluid-nya, digunakan fluida seperti; air, *Ethylene Glycol*, minyak dan pelumas, *Bio-fluids*.

2.2.5.1 Metode Satu Langkah

Metode satu langkah maksudnya adalah membuat partikel nano yang langsung kemudian langsung didispersikan ke fluida dasarnya.

Ada beberapa eksperimen yang dilakukan untuk membuat nanofluida metode satu langkah, antara lain dilakukan oleh *Liu et. al.* untuk meningkatkan konduktivitas termal dari air dicampur Cu dengan metode reduksi kimia. Nanopartikel tembaga (Cu) dihasilkan dalam air dengan mereduksi *Copper acetate*. Ion Cu^{2+} direduksi menjadi atom tembaga (Cu). Dari atom tembaga terjadi presipitasi membentuk partikel nano tembaga.

Copper acetate ($\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$) digunakan sebagai bahan baku yang direndam air *deionized*. Larutan diaduk pada temperatur 55°C dengan *nitrogen hydrazine* (N_2H_4) sebagai bahan produksi. Jumlah larutan hydrozine ditambah dengan tetap diaduk rata. Larutan didinginkan dengan suhu 0°C dan dibiarkan mengendap, kemudian dicuci dengan air *deionized* untuk membersihkan kotoran. Fraksi volum partikel nano Cu dalam larutan dibawah 0,2 vol %.

Eksperimen yang dilakukan oleh Zhu et al., dengan mereduksi $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dengan $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dalam ethylene glycole dengan iradiasi gelombang mikro. Nanofluida yang stabil dan tidak menggumpal dapat dihasilkan dengan metode ini. Hasilnya juga menunjukkan bahwa penambahan $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dan adanya radiasi gelombang mikro sangat mempengaruhi laju reaksi dan properties dari partikel nano Cu.

2.2.5.2 Metode Dua Langkah

Banyak dilakukan dalam sintesa nanofluida dengan menggunakan nano *powder* yang banyak diproduksi oleh industri secara komersil. Dengan metode ini, partikel nano dibuat dan dilarutkan dalam fluida dasar. Biasanya peralatan ultrasonik digunakan mendispersikan partikel dan mengurangi penggumpalan dari partikel.

Selain Das, S.K. et al. dan Putra, Nandy et al. (2002) yang telah diuraikan sebelumnya, beberapa peneliti lain juga menggunakan metode ini antara lain:

Murshed et al., menggunakan *ultrasonic dismembrator* yang digunakan selama 8-10 jam untuk membuat campuran yang bagus dengan fraksi volum yang berbeda dari nanopartikel TiO_2 kedalam fluida dasar

(*deionized water*). Diperlukan surfaktan untuk membuat partikel benar-benar terlarut. *Surfactant Oleic acid* dan *centyltrimethylammoniumbromide* (CTAB) digunakan untuk membuat larutan yang stabil dan terdispersi dengan baik tanpa mengganggu sifat termofisika dan sifat perpindahan panas karena surfaktan yang dipakai sangat kecil (persentasi volumenya 0,01-0,02%).

Xuan et al., juga menggunakan teknik yang sama untuk menyiapkan nanofluida. Dengan metode ini nanofluida didapat dengan mencampur langsung bubuk partikel nano dengan fluida dasar yang cukup praktis prosesnya larutan yang mengandung 2 samapi 5% volum partikel nano dengan fluida dasar air dan minyak. Larutan dicampur dengan menggunakan *ultrasonic vibrator* selama 10 jam.

Hong et al., menggunakan bubuk Fe *nanocrystalline* yang disintesa dengan proses kondensasi gas menggunakan besi carbonyl (Fe_5CO_5) sebagai pelarut dalam aliran helium atmosfer. Nanofluida disiapkan dengan prosedur 2 langkah untuk mendispersikan nano pertikel dalam *ethylene glycole*. Untuk membuat cairan tersebut benar-benar larut digunakan alat *ultrasonic cell disrupter*. Memperoleh hasil yang paling bagus pada 0,55% volum. Dengan meletakkan dalam *ultrasonic cell disrupter* selama 50 menit sonfikasi.

Kondensasi gas memiliki kelebihan dibandingkan dengan teknik yang lain karena partikel dapat dibuat dengan keadaan yang lebih bersih dan permukaannya dapat dindari dari pelapisan yang tidak dikehendaki. Namum, partikel yang diproduksi dengan teknik ini sering terjadi penggumpalan, dimana penggumpalan ini dapat dipecahkan menjadi kelompok yang lebih kecil dengan memberikan energi dalam jumlah yang kecil.

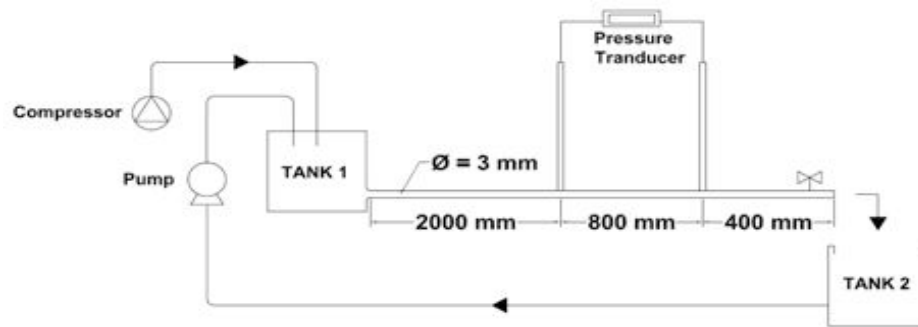
BAB III

DESKRIPSI ALAT UJI DAN PROSEDUR PENGUJIAN

3.1 Rancangan Alat Uji

Pada penelitian ini alat uji dirancang sendiri berdasarkan dasar teori dan pengalaman dari dosen pembimbing. Alat uji ini dirancang sebagai alat uji dengan skala laboratorium, yaitu penggunaan alat yang hanya ditunjukkan untuk penelitian dan pengambilan data dari sampel fluida yang akan dilakukan penelitian.

Rancangan alat uji seperti terlihat pada gambar 3.1 dimana fluida yang akan diuji ditempatkan pada penampungan fluida (tanki) kemudian dari penampungan ini akan ada sebuah saluran keluar dimana saluran tersebut akan terhubung dengan saluran pipa kecil yang berfungsi sebagai pipa kecil untuk memperlihatkan karakter fluida dengan dipasangkan manometer tube di sekitarnya. Selain itu terdapat katup yang mengontrol berapa besarnya aliran yang masuk melalui pipa penyalur fluida yang di pompa masuk ke tanki. Aliran yang dipompa akan masuk ke tanki dan menampung sementara fluida yang kemudian akan di alirkan untuk uji coba . katup tersebut pun guna mengontrol jumlah fluida yang tertampung di tanki. Bila fluida telah mencapai jumlah yang mencukupi maka pengontrolan fluida yang masuk ke tanki melalui katup harus lebih diperhatikan guna mengatur tekanan yang di timbulkan oleh aliran tersebut yang pasti mempengaruhi distribusi aliran fluida yang akan di keluarkan nanti. Katup berikutnya merupakan katup pengontrol fluida yang keluar dengan sudut kelengkungan tertentu, dipasang juga yang nantinya digunakan untuk mencari distribusi karakteristik aliran tiap-tiap perbedaan sudut.



Gambar 3.1 Instalasi Alat Uji

Alat uji terdiri dari sebuah pipa kapiler. Pada alat uji tersebut dipasang dua buah manometer, dimana manometer pertama diletakkan pada posisi 2 meter dari tangki penampung fluida dan manometer kedua pada posisi 0,8 meter dari manometer pertama. Pada saluran keluar fluida dipasang sebuah gelas ukur, dimana gelas ukur ini berfungsi untuk menghitung volume fluida yang keluar per satuan waktu atau dengan kata lain untuk mengukur debit. Di bawah gelas ukur ditempatkan sebuah neraca untuk menentukan massa jenis dari fluida yang mengalir.

Bahan Uji adalah nanofluida (TiO_2 dan Al_2O_3) yang dibuat dilaboratorium Departemen Teknik Kimia. Pembuatannya adalah dengan mencampur partikel nano TiO_2 atau Al_2O_3 dengan *aquadest* sebagai fluida dasarnya, yang kemudian dilakukan ultrasonifikasi agar partikel nano dan fluida dasarnya terdispersi sempurna. Untuk tiap jenis nanofluida dibuat 3 variasi konsentrasi volume, yaitu 5%, 3% dan 1%. Sesuai dengan persamaan di bawah ini:

$$\left[\frac{V_{\text{nanofluida}}}{(V_{\text{nanofluida}} + V_{\text{aquadest}})} \right] \times 100\% \quad (3.1)$$

3.2 Peralatan Pendukung

Pada alat uji ini terdapat beberapa komponen yang digunakan antara lain:

a. Pompa

Pompa yang digunakan sebagai alat uji ini adalah pompa jenis roda gigi.

b. Kompresor

Kompresor ini digunakan untuk membantu aliran pada saat pompa mengalami kekurangan tekanan.

c. Manometer

Manometer berfungsi untuk mengukur perbedaan tekanan dalam sebuah pipa jika terdapat fluida yang mengalir di dalamnya. Pada alat uji ini manometer yang digunakan adalah manometer jenis pipa kapiler..



Gambar 3.2 Manometer

d. Valve

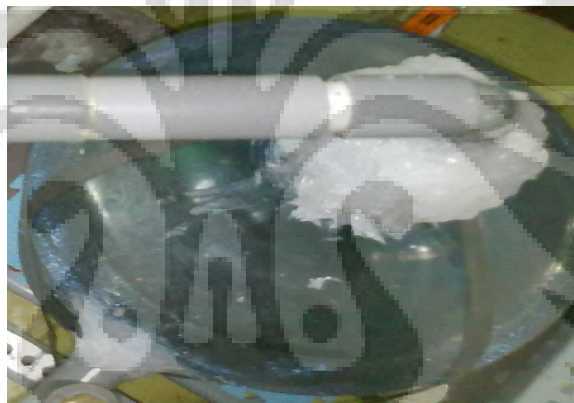
Valve ini digunakan untuk mengatur jumlah debit yang mengalir. Jenis valve yang digunakan adalah closed valve. Tujuannya agar dapat diatur variasi pembukaan yang sangat banyak, pada valve ini terdapat busur derajat yang fungsinya untuk menentukan berapa derajat pembukaan dari valve tersebut.



Gambar 3.3 Valve dengan Busur Derajat

e. Tangki

Tangki ini berfungsi untuk menampung nanofluida yang akan di alirkan ke pipa kapiler untuk di uji.



Gambar 3.4 Penampung cairan Fluida

3.3 Kondisi Pengujian

Konsentrasi Nano Partikel dalam hal ini masing-masing nanofluida Al_2O_3 dan TiO_2 sebelumnya juga mengalami variasi, dimana campuran yang digunakan adalah konsentrasi partikel volume 1%, 3% dan 5% yang tercampur air murni. konsentrasi partikel volume tersebut setelah tercampur kemudian diultrasonik selama 30 - 60 menit dengan temperatur tetap di 25°C .

Set up eksperimen ditunjukkan pada Gambar 3.1. nanofluid dialirkan oleh pompa piston dan dikumpulkan dalam tangki. Aliran dari nanofluid dikompresi oleh kompresor. Gradient pressure drop diukur pada 800 mm yaitu diantara pengukur tekanan masing-masing dengan

manometer. Diameter tekanan lubang 1,2 mm dan laju alir diukur dengan timbangan otomatis dalam periode waktu. Diameter dalam pipa lingkaran adalah 3 mm.

3.4 Prosedur Pengambilan Data

Fluida yang berupa Al_2O_3 dan TiO_2 dialirkan oleh pompa piston dan dikumpulkan ke dalam tangki. Variasi kecepatan diperoleh dengan cara mengatur pembukaan pada katup utama dimana variasi yang digunakan adalah pembukaan dari 10° (bukaan awal) sampai dengan 90° (valve terbuka penuh). Hal ini untuk mendapatkan variasi data yang lebih banyak.

3.5 Tahapan Pengujian

Pengambilan data untuk perhitungan minor losses.

- a. Masukkan fluida uji (Al_2O_3 atau TiO_2 dengan konsentrasi tertentu) ke dalam tangki penampungan sementara untuk di alirkan ke tangki penyimpanan utama
- b. Hidupkan pompa dan kompressor untuk mengalirkan nanofluida ke tangki utama
- c. Biarkan tangki terisi dengan nanofluida tersebut hingga dapat di perkirakan membuat aliran fluida nanti mengalir dengan konstan atau kontinu.
- d. Buka katup utama yang telah mempunyai ukuran sudut tersebut dengan beda sudut yang bervariasi.
- e. Atur katup tersebut mulai 10° sampai dengan 90°
- f. Setelah itu melihat perbedaan manometer yang ada di pipa kapiler setiap perbedaan atau variasi sudut.
- g. Mencatat perbedaan manometer pertama dan kedua hingga di dapat pressure drop dari setiap perbedaan jenis nanofluida dan juga perbedaan konsentrasinya.

Tahapan langkah uji coba tersebut dilakukan berturut-turut pada jenis nanofluida yang lain dan juga dengan nanofluida yang sama tetapi konsentrasi volumenya berbeda.



BAB IV

PENGOLAHAN DAN ANALISA DATA

4.1 Perhitungan Data

Percobaan yang dilakukan dalam penelitian ini menggunakan variabel tetap dan variabel bebas. Variabel tetap yang digunakan adalah jenis nanofluida yang digunakan (Al_2O_3 dan TiO_2) dan variasi konsentrasi untuk tiap nanofluida (5%, 3%, dan 1%). Sedangkan untuk variabel bebas adalah variasi bukaan katup (90° , 80° , 70° , 60° , 50° , 40° , 30° , 20° , 10°) untuk tiap jenis dan konsentrasi nanofluida.

Dari percobaan yang telah dilakukan, didapatkan data mentah berupa perbedaan tekanan manometer (Δh) dan debit aliran.

Massa jenis nanofluida diketahui dengan cara mengukur berat dari nanofluida berdasarkan jumlah volume dari nanofluida, sedangkan kecepatan aliran didapat dengan menampung fluida yang keluar dari pipa uji dengan gelas ukur, yang untuk kemudian dibagi dengan data waktu yang dibutuhkan untuk dapat mencapai volume tertentu.

4.1.1 Data TiO_2

a. Konsentrasi 5%

Berikut data hasil percobaan:

Tabel 4.1 Data Hasil Percobaan TiO_2 (5%)

V :	100	ml	D_{pipe} :	3	mm	0,003	m
	0,0001	m ³	L_{pipe} :	80	cm	0,8	m
m :	166	gr	g :	9,81	m/s		
ρ :	1660	kg/m ³					

Katup	h_1 (cm)	h_2 (cm)	ΔH (cm)	t (s)
90	152	113	39	21,2
80	140	101	39	22
70	128	90	38	22,8
60	120	83	37	23,4
50	114	79	35	25
40	108	74	34	26
30	96	65	31	28
20	89	60	29	30
10	85	58	27	32,2

Data di atas merupakan data hasil percobaan di laboratorium. Untuk mendapatkan debit alirannya maka volume yang sudah ditentukan (100 ml) dibagi dengan waktu yang diperlukan untuk memenuhi volume tersebut. Dari debit aliran ini akan didapatkan kecepatan fluida yang keluar dari pipa uji. Massa jenis nanofluida dapat dihitung dengan cara menimbang massa dari nanofluida tersebut kemudian membaginya dengan volume nanofluida tadi. Pada konsentrasi ini didapat massa jenis sekitar 1660 kg/m^3 . Nilai ΔP didapat dari perbedaan head pada manometer, setelah diolah maka data dapat ditampilkan sebagai berikut:

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Debit, Kecepatan dan ΔP

Q (m ³ /s)	u (m/s)	ΔP (pa)
4,7E-06	0,668	6453
4,5E-06	0,643	6400
4,4E-06	0,621	6293
4,3E-06	0,605	6187
4,0E-06	0,566	5867
3,8E-06	0,544	5638
3,6E-06	0,506	5184
3,3E-06	0,472	4773
3,1E-06	0,440	4447

Dari data di atas terlihat debit aliran semakin besar, seiring dengan semakin besarnya penutupan pada katup utama, oleh karena itu kecepatan aliran juga semakin besar. Dengan menggunakan rumus-rumus yang terdapat pada tinjauan pustaka dapat dicari tegangan geser serta gradient kecepatan dari konsentrasi fluida ini berdasarkan data yang telah didapat.

Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Tegangan Geser dan Gradient Kecepatan

τ (pa)	γ
6,05	1,78
6,00	1,72
5,90	1,66
5,80	1,61
5,50	1,51
5,29	1,45
4,86	1,35
4,47	1,26
4,17	1,17

Dengan mengetahui nilai shear stress dan shear rate, maka nilai power law index dapat dicari menggunakan bantuan rumus log maupun menggunakan rumus-rumus pada dasar teori. Setelah dihitung, nilai power law index untuk nanofluida ini adalah 0.95 sehingga nanofluida ini termasuk fluida Non-Newtonian dan lebih spesifiknya lagi merupakan fluida pseudoplastis.

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan *Apparent Viscosity* dan Gradient Kecepatan

γ	μ
1,78	0,00340
1,72	0,00350
1,66	0,00356
1,61	0,00360
1,51	0,00364
1,45	0,00364
1,35	0,00361

1,26	0,00356
1,17	0,00356

Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Bilangan *Reynolds* dan Koefisien Gesekan

Re	f
9,96E+02	6,42E-02
9,33E+02	6,86E-02
8,83E+02	7,25E-02
8,53E+02	7,50E-02
7,88E+02	8,12E-02
7,58E+02	8,44E-02
7,11E+02	9,00E-02
6,73E+02	9,52E-02
6,27E+02	1,02E-01

b. Konsentrasi 3%

Berikut data hasil percobaan:

Tabel 4.6 Data Hasil Percobaan TiO₂ (3%)

V :	100	ml	D _{pipe} :	3	mm	0,003	m
	0,0001	m ³	L _{pipe} :	80	cm	0,8	m
m :	163	gr	g :	9,81	m/s		
ρ :	1630	kg/m ³					

Katup	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	ΔH (cm)	t (s)
90	152	114	38	22
80	140	103	37	22,8
70	128	92	36	23,5
60	120	86	34	24,6
50	114	82	32	26,3
40	108	80	28	30
30	96	70	26	32,5
20	89	65	24	35
10	85	62	23	36,5

Data di atas merupakan data hasil percobaan di laboratorium. Untuk mendapatkan debit alirannya maka volume yang sudah ditentukan (100 ml) dibagi dengan waktu yang diperlukan untuk memenuhi volume tersebut. Dari debit aliran ini akan didapatkan kecepatan fluida yang keluar dari pipa uji. Massa jenis nanofluida dapat dihitung dengan cara menimbang massa dari nanofluida tersebut kemudian membaginya dengan volume nanofluida tadi. Pada konsentrasi ini didapat massa jenis sekitar 1630 kg/m^3 . Nilai ΔP didapat dari perbedaan head pada manometer, setelah diolah maka data dapat ditampilkan sebagai berikut:

Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Debit, Kecepatan dan ΔP

Q (m ³ /s)	u (m/s)	ΔP (pa)
4,5E-06	0,643	6080
4,4E-06	0,621	5867
4,3E-06	0,602	5760
4,1E-06	0,575	5440
3,8E-06	0,538	5120
3,3E-06	0,472	4480
3,1E-06	0,436	4160
2,9E-06	0,404	3840
2,7E-06	0,388	3733

Dari data di atas terlihat debit aliran semakin besar, seiring dengan semakin besarnya penutupan pada katup utama, oleh karena itu kecepatan aliran juga semakin besar. Dengan menggunakan rumus-rumus yang terdapat pada tinjauan pustaka dapat dicari tegangan geser serta gradient kecepatan dari konsentrasi fluida ini berdasarkan data yang telah didapat.

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan Tegangan Geser dan Gradient Kecepatan

τ (pa)	γ
5,7	1,72
5,5	1,66

5,4	1,61
5,1	1,53
4,8	1,44
4,2	1,26
3,9	1,16
3,6	1,08
3,5	1,03

Dengan mengetahui nilai shear stress dan shear rate, maka nilai power law index dapat dicari menggunakan bantuan rumus log maupun menggunakan rumus-rumus pada dasar teori. Setelah dihitung, nilai power law index untuk nanofluida ini adalah 0.98 sehingga nanofluida ini termasuk fluida Non-Newtonian dan lebih spesifiknya lagi merupakan fluida pseudoplastis.

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan *Apparent Viscosity* dan Gradient Kecepatan

γ	μ
1,72	0,00332
1,66	0,00332
1,61	0,00336
1,53	0,00332
1,44	0,00334
1,26	0,00334
1,16	0,00336
1,08	0,00334
1,03	0,00338

Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Bilangan *Reynolds* dan Koefisien Gesekan

Re	f
947,0	0,06758
913,7	0,07004
876,0	0,07306
846,5	0,07561

786,9	0,08134
691,1	0,0926
634,2	0,10092
592,4	0,10804
560,3	0,11423

c. Konsentrasi 1%

Berikut data hasil percobaan:

Tabel 4.11 Data Hasil Percobaan TiO₂ (1%)

V :	100	ml	D _{pipe} :	3	mm	0,003	m
	0,0001	m ³	L _{pipe} :	80	cm	0,8	m
m :	159	gr	g :	9,81	m/s		
ρ :	1590	kg/m ³					

Katup	h _i (cm)	Head (cm)	ΔH (cm)	t (s)
90	160	126	34	21,20
80	150	116	34	21,75
70	140	109	31	23,70
60	134	104	30	24,6
50	130	102	28	26,2
40	125	98	27	27,5
30	118	94	24	31
20	113	89	24	33
10	108	87	21	35

Data di atas merupakan data hasil percobaan di laboratorium. Untuk mendapatkan debit alirannya maka volume yang sudah ditentukan (100 ml) dibagi dengan waktu yang diperlukan untuk memenuhi volume tersebut. Dari debit aliran ini akan didapatkan kecepatan fluida yang keluar dari pipa uji. Massa jenis nanofluida dapat dihitung dengan cara menimbang massa dari nanofluida tersebut kemudian membaginya dengan volume nanofluida tadi. Pada konsentrasi ini didapat massa jenis sekitar 1590 kg/m³. Nilai ΔP

didapat dari perbedaan head pada manometer, setelah diolah maka data dapat ditampilkan sebagai berikut:

Tabel 4.12 Hasil Perhitungan Debit, Kecepatan dan ΔP

Q (m ³ /s)	u (m/s)	ΔP (pa)
4,72E-06	0,67	5323
4,6E-06	0,65	5301
4,22E-06	0,60	4832
4,07E-06	0,58	4683
3,82E-06	0,54	4363
3,64E-06	0,51	4213
3,23E-06	0,46	3744
3,03E-06	0,43	3723
2,86E-06	0,40	3275

Dari data di atas terlihat debit aliran semakin besar, seiring dengan semakin besarnya penutupan pada katup utama, oleh karena itu kecepatan aliran juga semakin besar. Dengan menggunakan rumus-rumus yang terdapat pada tinjauan pustaka dapat dicari tegangan geser serta gradient kecepatan dari konsentrasi fluida ini berdasarkan data yang telah didapat.

Tabel 4.13 Hasil Perhitungan Tegangan Geser dan Gradient Kecepatan

τ (pa)	γ
4,99	1,78
4,97	1,74
4,53	1,59
4,39	1,53
4,09	1,44
3,95	1,37
3,51	1,22
3,49	1,14
3,07	1,08

Dengan mengetahui nilai shear stress dan shear rate, maka nilai power law index dapat dicari menggunakan bantuan rumus log maupun menggunakan rumus-rumus pada dasar teori. Setelah dihitung, nilai power law index untuk nanofluida ini adalah 0.99 sehingga nanofluida ini termasuk fluida Non-Newtonian dan lebih spesifiknya lagi merupakan fluida pseudoplastis.

Tabel 4.14 Hasil Perhitungan *Apparent Viscosity* dan Gradient Kecepatan

γ	μ
1,78	2,80E-03
1,74	2,86E-03
1,59	2,84E-03
1,53	2,86E-03
1,44	2,84E-03
1,37	2,88E-03
1,22	2,88E-03
1,14	3,05E-03
1,08	2,85E-03

Tabel 4.15 Hasil Perhitungan Bilangan *Reynolds* dan Koefisien Gesekan

Re	f
1136,29	0,05632
1083,90	0,05905
1001,54	0,0639
959,24	0,06672
907,69	0,07051
853,10	0,07502
755,50	0,08471
670,52	0,09545
677,62	0,09445

4.1.2 Data Al₂O₃

a. Konsentrasi 5%

Berikut data hasil percobaan:

Tabel 4.16 Data Hasil Percobaan Al₂O₃ (5%)

V :	100	ml	D _{pipe} :	3	mm	0,003	m
	0,0001	m ³	L _{pipe} :	80	cm	0,8	m
m :	169	gr	g :	9,81	m/s		
ρ :	1690	kg/m ³					

Katup	h ₁ (cm)	h ₂ (cm)	ΔH (cm)	t (s)
90	152	110	42	22
80	140	100	40	23
70	128	88	40	24
60	120	84	36	25,5
50	114	78	36	27
40	108	76	32	28,8
30	96	64	32	31,3
20	89	61	28	33
10	85	58	27	35,8

Data di atas merupakan data hasil percobaan di laboratorium. Untuk mendapatkan debit alirannya maka volume yang sudah ditentukan (100 ml) dibagi dengan waktu yang diperlukan untuk memenuhi volume tersebut. Dari debit aliran ini akan didapatkan kecepatan fluida yang keluar dari pipa uji. Massa jenis nanofluida dapat dihitung dengan cara menimbang massa dari nanofluida tersebut kemudian membaginya dengan volume nanofluida tadi. Pada konsentrasi ini didapat massa jenis sekitar 1690 kg/m³. Nilai ΔP didapat dari perbedaan head pada manometer, setelah diolah maka data dapat ditampilkan sebagai berikut:

Tabel 4.17 Hasil Perhitungan Debit, Kecepatan dan ΔP

Q (m ³ /s)	u (m/s)	ΔP (pa)
4,5E-06	0,643	6933
4,3E-06	0,615	6613
4,2E-06	0,590	6574
3,9E-06	0,555	5973
3,7E-06	0,524	5929
3,5E-06	0,491	5333
3,2E-06	0,452	5229
3,0E-06	0,429	4693
2,8E-06	0,395	4513

Dari data di atas terlihat debit aliran semakin besar, seiring dengan semakin besarnya penutupan pada katup utama, oleh karena itu kecepatan aliran juga semakin besar. Dengan menggunakan rumus-rumus yang terdapat pada tinjauan pustaka dapat dicari tegangan geser serta gradient kecepatan dari konsentrasi fluida ini berdasarkan data yang telah didapat.

Tabel 4.18 Hasil Perhitungan Tegangan Geser dan Gradient Kecepatan

τ (pa)	γ
6,5	1,72
6,2	1,64
6,2	1,57
5,6	1,48
5,6	1,40
5,0	1,31
4,9	1,21
4,4	1,14
4,2	1,05

Dengan mengetahui nilai shear stress dan shear rate, maka nilai power law index dapat dicari menggunakan bantuan rumus log maupun menggunakan rumus-rumus pada dasar teori. Setelah

dihitung, nilai power law index untuk nanofluida ini adalah 0.97 sehingga nanofluida ini termasuk fluida Non-Newtonian dan lebih spesifiknya lagi merupakan fluida pseudoplastis.

Tabel 4.19 Hasil Perhitungan *Apparent Viscosity* dan Gradient Kecepatan

γ	μ
1,72	0,00379
1,64	0,00378
1,57	0,00392
1,48	0,00378
1,40	0,00398
1,31	0,00382
1,21	0,00407
1,14	0,00385
1,05	0,00401

Tabel 4.20 Hasil Perhitungan Bilangan *Reynolds* dan Koefisien Gesekan

Re	f
8,61E+02	7,43E-02
8,26E+02	7,75E-02
7,63E+02	8,39E-02
7,44E+02	8,60E-02
6,69E+02	9,57E-02
6,53E+02	9,80E-02
5,64E+02	1,13E-01
5,65E+02	1,13E-01
5,00E+02	1,28E-01

b. Konsentrasi 3%

Berikut data hasil percobaan:

Tabel 4.21 Data Hasil Percobaan Al_2O_3 (3%)

V :	100	ml	D_{pipe} :	3	mm	0.003	m
	0,0001	m ³	L_{pipe} :	80	cm	0.8	m
m :	165	gr	g :	9,81	m/s		
ρ :	1650	kg/m ³					

Katup	h1 (cm)	h2 (cm)	ΔH (cm)	t (s)
90	152	113	39	21,6
80	140	103	37	22,7
70	128	93	35	24
60	120	87	33	25,2
50	114	83	31	26,7
40	108	77	31	28,6
30	96	69	27	30,7
20	89	64	25	33
10	85	60	25	35,8

Data di atas merupakan data hasil percobaan di laboratorium. Untuk mendapatkan debit alirannya maka volume yang sudah ditentukan (100 ml) dibagi dengan waktu yang diperlukan untuk memenuhi volume tersebut. Dari debit aliran ini akan didapatkan kecepatan fluida yang keluar dari pipa uji. Massa jenis nanofluida dapat dihitung dengan cara menimbang massa dari nanofluida tersebut kemudian membaginya dengan volume nanofluida tadi. Pada konsentrasi ini didapat massa jenis sekitar 1650 kg/m³. Nilai ΔP didapat dari perbedaan head pada manometer, setelah diolah maka data dapat ditampilkan sebagai berikut:

Tabel 4.22 Hasil Perhitungan Debit, Kecepatan dan ΔP

Q (m ³ /s)	u (m/s)	ΔP (pa)
4,6E-06	0,655	6293
4,4E-06	0,624	6002
4,2E-06	0,590	5653
4,0E-06	0,562	5333
3,7E-06	0,530	5013
3,5E-06	0,495	4948
3,3E-06	0,461	4373
3,0E-06	0,429	4053
2,8E-06	0,395	4034

Dari data di atas terlihat debit aliran semakin besar, seiring dengan semakin besarnya penutupan pada katup utama, oleh karena itu kecepatan aliran juga semakin besar. Dengan menggunakan rumus-rumus yang terdapat pada tinjauan pustaka dapat dicari tegangan geser serta gradient kecepatan dari konsentrasi fluida ini berdasarkan data yang telah didapat.

Tabel 4.23 Hasil Perhitungan Tegangan Geser dan Gradient Kecepatan

τ (pa)	γ
5,9	1,75
5,6	1,66
5,3	1,57
5,0	1,50
4,7	1,41
4,6	1,32
4,1	1,23
3,8	1,14
3,8	1,05

Dengan mengetahui nilai shear stress dan shear rate, maka nilai power law index dapat dicari menggunakan bantuan rumus log maupun menggunakan rumus-rumus pada dasar teori. Setelah

dihitung, nilai power law index untuk nanofluida ini adalah 0.99 sehingga nanofluida ini termasuk fluida Non-Newtonian dan lebih spesifiknya lagi merupakan fluida pseudoplastis.

Tabel 4.24 Hasil Perhitungan *Apparent Viscosity* dan Gradient Kecepatan

γ	μ
1,75	0,00338
1,66	0,00338
1,57	0,00337
1,50	0,00334
1,41	0,00332
1,32	0,00352
1,23	0,00333
1,14	0,00332
1,05	0,00359

Tabel 4.25 Hasil Perhitungan Bilangan *Reynolds* dan Koefisien Gesekan

Re	f
961	0,06662
912	0,07017
866	0,07388
833	0,07684
789	0,08109
697	0,09183
684	0,09352
639	0,10015
546	0,11731

c. Konsentrasi 1%

Berikut data hasil percobaan:

Tabel 4.26 Data Hasil Percobaan Al_2O_3 (1%)

V :	100	ml	D_{pipe} :	3	mm	0.003	m
	0,0001	m ³	L_{pipe} :	80	cm	0.8	m
m :	161	gr	g :	9,81	m/s		
ρ :	1610	kg/m ³					

Katup	h1 (cm)	h2 (cm)	ΔH (cm)	t (s)
90	160	130	30	22,12
80	150	121	29	23
70	140	111	29	24,40
60	134	108	26	25,5
50	130	103	27	26,3
40	125	101	24	27,4
30	118	95	23	28,7
20	113	90	23	29,8
10	108	87	21	31,5

Data di atas merupakan data hasil percobaan di laboratorium. Untuk mendapatkan debit alirannya maka volume yang sudah ditentukan (100 ml) dibagi dengan waktu yang diperlukan untuk memenuhi volume tersebut. Dari debit aliran ini akan didapatkan kecepatan fluida yang keluar dari pipa uji. Massa jenis nanofluida dapat dihitung dengan cara menimbang massa dari nanofluida tersebut kemudian membaginya dengan volume nanofluida tadi. Pada konsentrasi ini didapat massa jenis sekitar 1610 kg/m³. Nilai ΔP didapat dari perbedaan head pada manometer, setelah diolah maka data dapat ditampilkan sebagai berikut:

Tabel 4.27 Hasil Perhitungan Debit, Kecepatan dan ΔP

Q (m ³ /s)	u (m/s)	ΔP (pa)
4,52E-06	0,64	4737
4,35E-06	0,62	4577
4,1E-06	0,58	4588
3,92E-06	0,56	4108
3,8E-06	0,54	4204
3,65E-06	0,52	3788
3,48E-06	0,49	3638
3,36E-06	0,47	3692
3,17E-06	0,45	3318

Dari data di atas terlihat debit aliran semakin besar, seiring dengan semakin besarnya penutupan pada katup utama, oleh karena itu kecepatan aliran juga semakin besar. Dengan menggunakan rumus-rumus yang terdapat pada tinjauan pustaka dapat dicari tegangan geser serta gradient kecepatan dari konsentrasi fluida ini berdasarkan data yang telah didapat.

Tabel 4.28 Hasil Perhitungan Tegangan Geser dan Gradient Kecepatan

τ (pa)	γ
4,441	1,706363
4,291	1,641076
4,301	1,546916
3,851	1,480186
3,941	1,435162
3,551	1,377546
3,411	1,315148
3,461	1,266602
3,111	1,198246

Dengan mengetahui nilai shear stress dan shear rate, maka nilai power law index dapat dicari menggunakan bantuan rumus log maupun menggunakan rumus-rumus pada dasar teori. Setelah

dihitung, nilai power law index untuk nanofluida ini adalah 0.995 sehingga nanofluida ini termasuk fluida Non-Newtonian dan lebih spesifiknya lagi merupakan fluida pseudoplastis.

Tabel 4.29 Hasil Perhitungan *Apparent Viscosity* dan Gradient Kecepatan

γ	μ
1,706363	2,60E-03
1,641076	2,61E-03
1,546916	2,78E-03
1,480186	2,60E-03
1,435162	2,75E-03
1,377546	2,58E-03
1,315148	2,59E-03
1,266602	2,73E-03
1,198246	2,60E-03

Tabel 4.30 Hasil Perhitungan Bilangan *Reynolds* dan Koefisien Gesekan

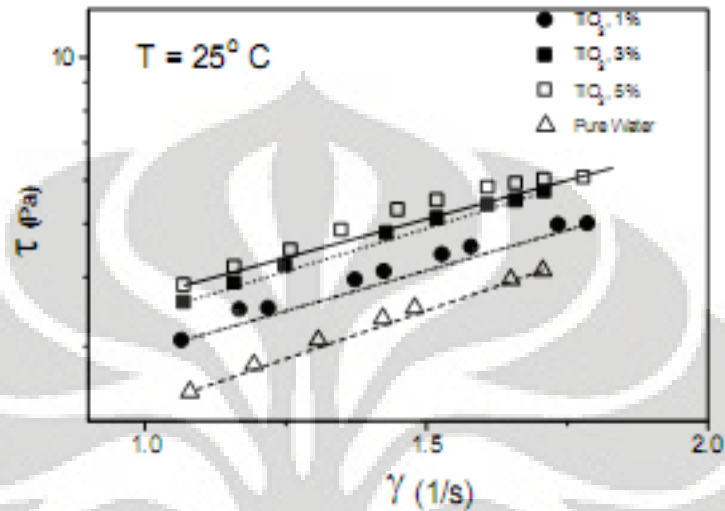
Re	f
1,19E+03	0,05389
1,14E+03	0,0563
1,01E+03	0,06351
1,03E+03	0,06211
9,47E+02	0,06761
9,68E+02	0,06612
9,18E+02	0,06968
8,40E+02	0,07623
8,36E+02	0,07656

4.2 Analisis Data

Berdasarkan perhitungan data, dapat terlihat perbedaan angka-angka yang muncul untuk setiap variabel percobaan. Angka-angka tersebut kemudian kita visualisasikan dalam bentuk kurva perbandingan untuk

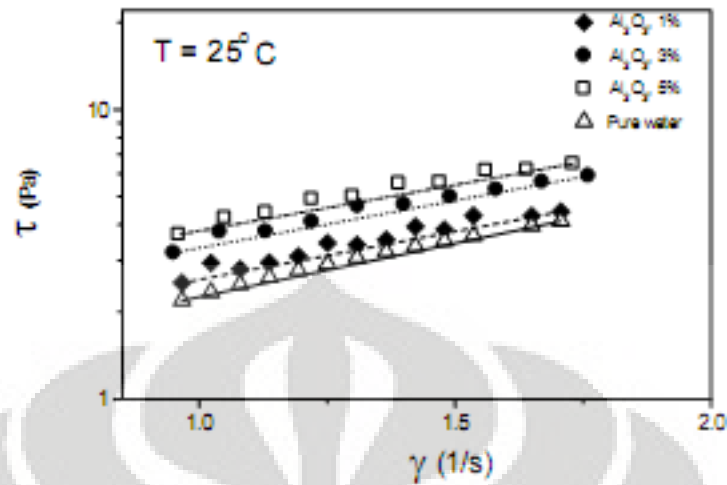
melihat korelasi antara *shear rate* ($\dot{\gamma}$) - *shear stress* (τ), *shear rate* ($\dot{\gamma}$) - *apparent viscosity* (η), dan *Reynolds number* (Re^*) - *coefficient of friction* (f).

Gambar 4.1 Karakteristik Reologi TiO₂



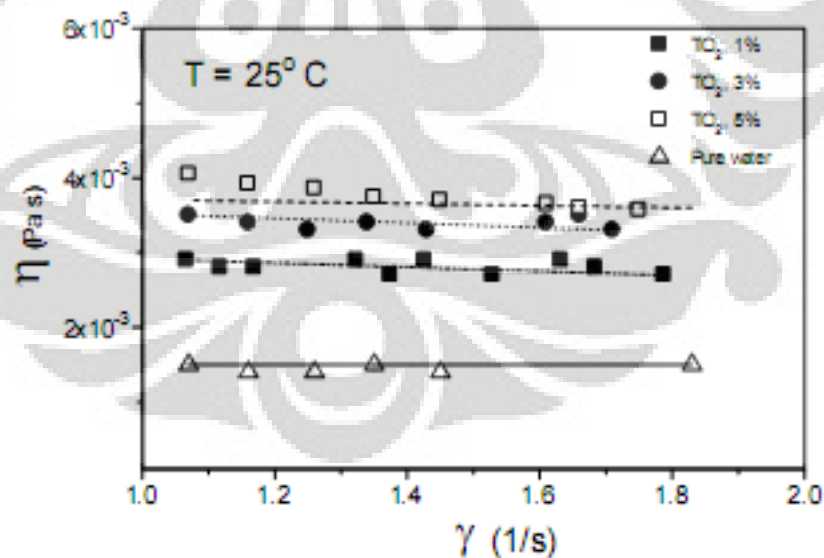
Gambar 4.1 menunjukkan kurva aliran TiO₂ yang diukur dengan menggunakan pipa bulat ($D = 3$ mm) horisontal. Pada saat percobaan, suhu dijaga konstan ($T=25^{\circ}\text{C}$) karena Reologi sangat bergantung pada suhu. Dengan standar *tangent-drawing procedures*, dibuat garis singgung yang membentuk sebuah kurva di berbagai $8V/D$. Dari kurva yang terbentuk, bisa didapatkan nilai n berdasarkan *tangent slop*. Serta didapatkan juga nilai K dari pertemuan garis singgung di $8V/D$. Kurva aliran antara *shear stress* (τ) yang diplot terhadap *shear rate* ($\dot{\gamma}$), untuk data TiO₂ 5% adalah tidak paralel dengan kurva aliran TiO₂ 1% dan 3%. Yang mengindikasikan material ini adalah *power law fluid* dalam rentang *shear stress*. Yang nilai dari *power law index* (n) dari TiO₂ 5% tersebut adalah $0.95 \sim 1.0$.

Gambar 4.2 Karakteristik Reologi Al_2O_3



Gambar 4.2 menunjukkan kurva aliran Al_2O_3 yang diukur dengan menggunakan pipa bulat ($D = 3$ mm) horisontal. Hasil data Al_2O_3 (konsentrasi 1%, 3%, dan 5%) yang diplot dalam satu kurva aliran adalah membentuk kurva yang saling paralel. Yang mengindikasikan material ini adalah sebuah fluida Newtonian dalam rentang *shear stress*.

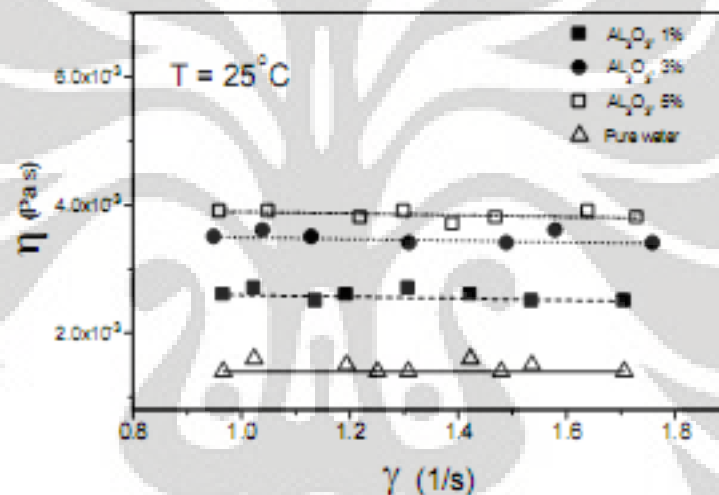
Gambar 4.3 *Apparent Viscosity* dari TiO_2



Data viskositas yang ada pada Gambar 4.3 diukur dengan viskometer pipa bulat ($D = 3$ mm) horisontal yang tergantung juga dengan data dari TiO_2 (konsentrasi 1%, 3%, dan 5%). Gambar ini mempresentasikan korelasi antara *apparent viscosity* dengan *shear rate*.

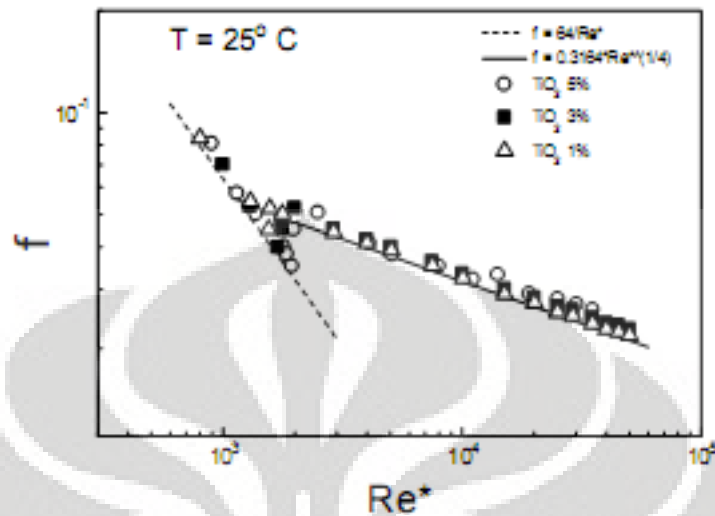
Yang menunjukkan bahwa adanya peningkatan viskositas seiring peningkatan konsentrasi volume. Pengukuran viskositas tergantung pada tipe viskometer dan histeresis dari *shear stress* atau *shear rate* yang mungkin terjadi. Karena terlalu banyaknya parameter yang mempengaruhi viskositas dari nanofluida maka untuk menghitung bilangan *Reynold* yang umum (Re^*) digunakan *apparent viscosity* dari nanofluida tersebut. Dalam studi ini, *rheogram* untuk TiO_2 5% didasarkan pada data pengukuran *pressure drop* yang ada. Hal ini menunjukkan viskosimetri TiO_2 5% bervariasi pada daerah *shear rate* yang rendah.

Gambar 4.4 *Apparent Viscosity* dari Al_2O_3



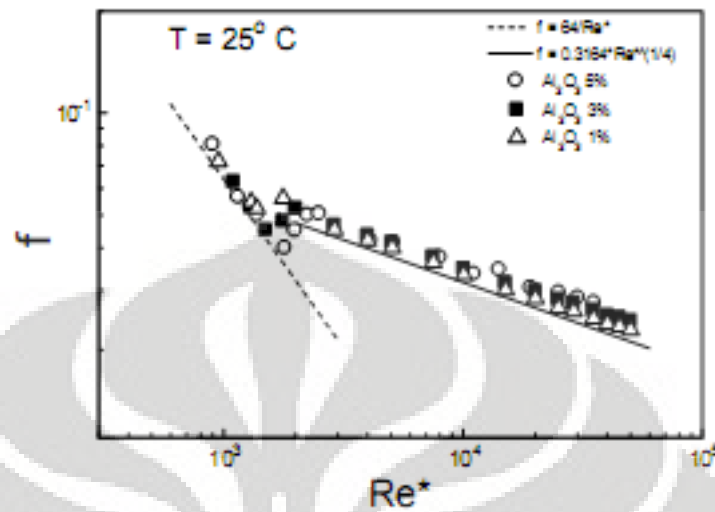
Data viskositas yang ada pada Gambar 4.4 diukur dengan viskometer pipa bulat ($D = 3$ mm) horisontal yang tergantung juga dengan data dari Al_2O_3 (konsentrasi 1%, 3%, dan 5%). Gambar ini mempresentasikan korelasi antara *apparent viscosity* dengan *shear rate*. Yang menunjukkan bahwa viskositas dari Al_2O_3 adalah konstan pada gradasi *shear rate*, yang merupakan fluida Newtonian.

Gambar 4.5 Koefisien Gesek TiO₂ pada Pipa Bulat (D = 3 mm)
Horisontal



Gambar 4.5 mempresentasikan korelasi antara koefisien gesek TiO₂ (konsentrasi 1%, 3%, 5%) dengan bilangan *Reynolds*-nya. Untuk garis putus-putus yang terbentuk adalah hasil dari analisis dengan menggunakan persamaan Hagen Pouiselle (*Hagen Pouiselle equation*) sebagai persamaan untuk aliran laminar. Sedangkan untuk garis tух yang terbentuk adalah hasil dari analisis dengan menggunakan persamaan Blasius (*Blasius equation*) sebagai persamaan aliran turbulen. Kurva koefisien gesek TiO₂ (konsentrasi 1%, 3%, 5%) yang terbentuk dibandingkan dengan kurva koefisien gesek air murni. Yang menunjukkan bahwa adanya sedikit peningkatan koefisien gesek TiO₂ dibandingkan dengan air murni. Korelasi antara koefisien gesek dengan bilangan *Reynolds* dapat juga digunakan untuk memprediksi karakteristik *pressure drop* dalam pipa bulat horisontal (D = 3 mm) secara lebih akurat. Yang pengaruh dari degradasi nanofluida tersebut dapat dihitung dengan pengukuran koefisien gesekan pada pipa.

Gambar 4.6 Koefisien Gesek Al_2O_3 pada Pipa Bulat ($D = 3 \text{ mm}$)
Horisontal



Gambar 4.6 mempresentasikan korelasi antara koefisien gesek Al_2O_3 (konsentrasi 1%, 3%, 5%) dengan bilangan *Reynolds*-nya. Kurva koefisien gesek Al_2O_3 (konsentrasi 1%, 3%, 5%) yang terbentuk dibandingkan dengan kurva koefisien gesek air murni. Yang menunjukkan bahwa adanya sedikit peningkatan koefisien gesek TiO_2 dibandingkan dengan air murni. Kenaikan koefisien gesek disebabkan oleh suspensi nanopartikel dalam fluida murni. Pada gambar juga terlihat bahwa semua data Al_2O_3 terletak di atas garis persamaan *Blasius*. Hal ini menunjukkan bahwa variasi konsentrasi volume partikel nanofluida tidak berpengaruh pada koefisien gesekan pada pipa.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Studi eksperimental yang telah dilakukan untuk menyelidiki nanopartikel TiO₂ dan Al₂O₃. Kurva karakteristik nanofluida diukur dengan viskometer pipa bulat ($D = 3 \text{ mm}$) horisontal dan menghitung *shear stress* dan *shear rate* pada dinding pipa dengan mengukur laju aliran dan *pressure drop*. Hasil dari penelitian dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. TiO₂ dengan volume konsentrasi 1% dan 3% merupakan nanofluida yang berperilaku sebagai fluida Newtonian. Sedangkan TiO₂ dengan volume konsentrasi 5% merupakan nanofluida yang berperilaku sebagai fluida pseudoplastis. Model *power law* menggambarkan perilaku TiO₂ yang harga *power law index*-nya berkisar antara 0.95 ~ 1.0 ($n = 0.95 \sim 1.0$).
2. Viskositas relatif nanofluida meningkat seiring peningkatan konsentrasi nanopartikel.
3. *Pressure Loss* dari nanofluida cenderung sedikit meningkat dibandingkan dengan air murni.

5.2 Saran

Dari penelitian ini ada beberapa saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya, antara lain adalah sebagai berikut:

1. Penelitian hendaknya dilanjutkan untuk meneliti *heat transfer* (khususnya konveksi) dari nanofluida yang telah diteliti.
2. Pengujian untuk nanofluida jenis lain pada alat uji ini sangat diharapkan sebagai bahan pembandingan dalam penelitian ini agar penelitian pada nanofluida makin sempurna.

DAFTAR PUSTAKA

- Maxwell, J. C., 1881, *A Treatise on Electrical and Magnetism*, 2nd Ed., 1, Clarendon Press, Oxford, U.K., pp. 435
- Choi, U. S., 1995, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids With Nanoparticles," *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*, D. A. Siginer and H. P. Wang, eds., FED-vol. 231/MD-Vol. 66, ASME, New York, pp. 99–105.
- Eastman, J. A., Choi, U. S., Li, S., Yu, W., and Thompson, L. J., 2001, "Anomalously Increased Effective Thermal Conductivities of Ethylene Glycol-Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles," *Appl. Phys. Lett.*, **78**~6!, pp. 718–720.
- Xuan, Y., and Li, Q., 2000, "Heat Transfer Enhancement of Nanofluids," *Int. J. Heat Fluid Flow*, **21**, pp. 58–64.
- Hamolton, R. L., and Crosser, O.K., 1962, "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two Component systems," *1& EC Fundamentals*, 1(3), pp 187-191
- Wasp, E. J., J. P Kenny, dan R.L. Gandhi (1977). "Solid – Liquid Slurry Pipeline Transportation, Series On Bulk Material Handling," *Trans. Tech. Publication*. Clausthal. Germany.
- Das, S.K., Putra, N., Thiesen, P., Roetzel, W., "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluid," *Jurnal of Heat Transfer* (AUGUST 2003), ASME, Vol. 125, pp 567-574
- Sarit K. Das, et al. 2008. *Nanofluids: Science and Technology*. Willey: New Jersey
- Lee, S., Choi, U. S., Li, S., and Eastman, J. A., 1999, "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles," *ASME J.Heat Transfer*, 121, pp, 280-289
- Putra Nandy, W. Roetzel, Sarit K. Das, "Natural Convection of Nano- fluids," *Jurnal of Heat Transfer*, Vol. 39, Number 8-9 (2003), pp 775-784
- Putra Nandy, S Maulana, Danardono, "Menentukan Koefisien Perpindahan Kalor Konveksi Paksa Dengan Menggunakan Metode Wilson Plot," *Proceeding Seminar Nasional Perkembangan Reset dan Teknologi*, 2005. UGM Yogyakarta, 25 Mei 2005
- Putra, Nandy dkk. 2005. *Kenaikan Koefisien Perpindahan Kalor Kondensasi Film*

Pada Kondenser Silinder Vertikal Dengan Nanofluida Al₂O₃ – Air sebagai Fluida Pendingin, Jurnal Teknologi Edisi No. 1 Tahun XIX, Maret 2005, 1-10 ISSN 0215-1685

- Xuan, Y., and Li, Q., 2000, “Heat Transfer Enhancement of Nanofluids,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, **21**, pp. 58–64.
- Louis Gosselin, Alexandre K da Silva, “Combined Heat Transfer and Power Dissipation Optimization of Nanofluids Flow,” *Applied Physics Letters*, Vol. 85, no. 18, (2004)
- Nanophase Technologies, Romeoville, IL, USA, <http://www.nanophase.com>
- Talbot, L., R. K. Cheng, R. W. Schefer, and D. R. Willis (1980). “Thermophoresis of Particles In Heated Boundary Layer,” *J. Fluid Mech*, 101: 737-758
- Yamamoto, K, dan Y. Ishihara (1988), “Thermoporesis Of Spherical Particle in a Rarefied Gas of Transition Regime,” *Phys. Fluids*, 31: 3618- 3624.
- B.C. Pak, Y.I. Cho,” Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles, “ *Experimental Heat Transfer* 11 (2) (1998) 151–170.
- Liu, K. V., Choi, U. S., and Kasza, K. E., 1988, “Measurement of Pressure Drop and Heat Transfer in Turbulent Pipe Flows of Particulate Slurries,” *Argonne National Laboratory Report*, ANL-88-15.
- Zhu. H., Y. Lin, and Y. Yin (2004), “ A Novel One-step chemical Method For Preparation of Copper Nanofluids,” *J. Colloid Interface Sci.*, 277; 100-103.
- Mursed, S. M. S., K. C. Leong, dan C. Yang (2005), “Enhanced Thermal Conductivity of TiO₂ – Water Based Nanofluids,” *Int. J. Therm. Sci.*,44;367-373
- Hong, T. K., H. S. Yang, dan C. J. Choi, (2005), “Study of The Enhanced Thermal Conductivity of Fe Nanofluids,” *J. Appl. Phys.*,97; 064311
- Cong T. N., Gilles R, Christian, Nicolas G, “Heat transfer enhancement using Al₂O₃–water nanofluid for an electronic liquid cooling system” *Applied Thermal Engineering* (2006) 27; 1501-1506
- Incropera, F. P., dan D. P. DeWitt (1998), *Fundamental of Heat Transfer*, 4th ed., Wiley, New York.
- P. Keblinski, J.A. Eastman, D.G. Cahill, “Nanofluids for thermal transport,” *Materials Today* (June) (2005) 36–44.

- Holman, J. P., (1986), *Perpindahan Kalor*, 6th ed., McGraw-Hill, New York
- AHP Skelland. *Non Newtonian Flow and Heat Transfer*. John Willey & Sons. Inc 1967. Pp. 37-47
- Baha. E. abulnaga. *Slurry Syatem Handbook*. New York : Mc Graw Hill. 2002
- Kurniawan, I Wayan Eka. *Hambatan Gesek Aliran Lumpur Lapindo dalam Pipa*. Skripsi. 2007
- Munson, Bruce R, Young, Donald F, and Okiishi, Theodore H. *Fundamental of Fluids Mechanics*. fourth edition, John Willey & Sons, Inc. 2002
- S. Plumlee. Geoffrey, dkk. *Premilinary Analytical Result for a Mud Sample Collected from the LUSI Mud Vulcano, Sidoarjo, East Java, Indonesia..* USGS. Science for a Changing World. 2008.
- Watanabe, K, Yanuar, Udagawa, H., 1997-5. *Drag Reduction of Newtonian Fluids in a Circular Pipe with Higly Water Repellent Walls*. The 3rd International Symposium on Performance Enhancement for Marine Aplications. Newport, Rhodeisland. pp. 157-162
- Watanabe, K. Yanuar., and H udagawa. *Drag Reduction of Newtonian Fluid in a Circular Pipe with Highly Water Repellent Wall*. Journal of Fluid Mech.225.1999
- Watanabe.Keizo, Uchida.Noboru, and Kato. Hiroshi. *Gas Solid Mixture Flow in a Spiral Tube*. Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineerings. 1995
- Wilkinson, W.I. *Non-Newtonian Fluids*. London. Pergamon Press.1960
- Yanuar and Watanabe K. *Drag Reduction of Guar Gum in Crude Oil*. The 13th. International Symposium on Transport Phenomena. Victoria Canada. Elsevier.2002.p.833-836
- Krause, Egon. *Fluids Mechanics*. Springer. 2005