



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI EKSPERIMENTAL  $\text{TiO}_2$  NANOFUIDA TERHADAP  
KINERJA PENGHANTARAN PANAS *SINTERED HEAT PIPE***

**SKRIPSI**

**ANDYANTO**

**0806325900**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**PROGRAM STUDI S1 FISIKA**

**DEPOK**

**November 2012**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI EKSPERIMENTAL  $\text{TiO}_2$  NANOFUIDA TERHADAP  
KINERJA PENGHANTARAN PANAS *SINTERED HEAT PIPE***

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains**

**ANDYANTO**

**0806325900**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**PROGRAM STUDI S1 FISIKA**

**DEPOK**

**November 2012**

ii

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Andyanto  
NPM : 0806325900  
Tanda Tangan :   
Tanggal : 30 November 2012

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :

Nama : Andyanto

NPM : 0806325900

Program Studi : Fisika

Judul Skripsi : Studi Eksperimental  $\text{TiO}_2$  Nanofluida Terhadap Kinerja  
Pengantaran Panas *Sintered Wick Heat Pipe*

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing I : Prof. Dr.rer.nat. Rosari Saleh

(.....)

Pembimbing II : Prof. Dr-Ing Nandy Putra

(.....)

Penguji I : Dr. techn Djoko Triyono

(.....)

Penguji II : Efta Yudiarsah Ph.D.

(.....)

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 30 November 2012

## KATA PENGANTAR

Puji syukur dipanjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Pengasih atas segala limpahan berkat, kasih sayang, dan karunia-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan penelitian dan penyusunan skripsi ini. Penulis menyadari bahwa penyelesaian skripsi ini bukan hanya atas hasil usaha sendiri, melainkan karena bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak sejak awal masa perkuliahan, penelitian, dan sampai pada penyusunan skripsi ini. Tanpa mereka, penulis akan sulit mencapai tahap penyelesaian skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Prof. Dr.rer.nat. Rosari Saleh dan Prof. Dr-Ing Nandy Putra sebagai pembimbing yang telah meluangkan waktu untuk membimbing, dan mengajarkan banyak hal baik itu ilmu akademis, pandangan terhadap dunia serta pengalaman-pengalaman yang berharga.
2. Papa, mama, Anton dan Ian serta keluarga besar yang selalu memberikan semangat untuk selalu belajar.
3. Dr. techn Djoko Triyono dan Efta Yudiarsah Ph.D. selaku penguji yang telah memberikan saran-saran sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
4. DRPM UI yang membantu dalam penyediaan dana riset *Nanofluid* dan *heat pipe*.
5. Romualdus Enggar sebagai rekan penelitian dan teman diskusi. Teman-teman R103A Nadia, Jeff, Santi, ka Endo dan ka Yones. Teman-teman AHTRG mas Wayan, mas Ridho, Pak Mulya, Bu Dinni, AHTRG08 dan AHTRG09.
6. Dwi dan Haryo yang membantu sintesa nanopartikel.
7. Bapak Zaenal dari Departemen Teknik Metalurgi dan Material dan Pak Arbi dari BATAN yang membantu dalam pembuatan *heat pipe* dan karakterisasi SEM & EDX
8. Rekan-rekan seperjuangan CM 08 lainnya: Garry, Dita, dan Nume.
9. Anak-anak Fiska 08 yang bersama-sama menjalani masa-masa kuliah.

10. Anak-anak KMK MIPA UI dan anak-anak Pondok Latief yang menjadi *oase* di saat-saat sulit penelitian.

11. Margaretha Silvana Mawar Utami yang selalu memberikan perhatian, semangat, saran-saran dan bantuan-bantuan selama penelitian dan penulisan.

Akhirnya hanya doa dan harapan yang bisa penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Pengasih untuk memberkati pihak-pihak yang telah membantu penyelesaian skripsi ini. Penulis menyadari masih banyak kekurangan dalam penulisan skripsi ini, namun penulis berharap semoga skripsi ini dapat berguna untuk penelitian-penelitian selanjutnya.

Penulis

2012

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

---

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

Nama : Andyanto  
NPM : 0806325900  
Program Studi : S1 Fisika  
Fakultas : Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Jenis karya : Skripsi

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

Studi Eksperimental TiO<sub>2</sub> Nanofluida Terhadap Kinerja Penghantaran Panas *Sintered Wick Heat Pipe*

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan 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 : 30 November 2012  
Yang menyatakan



(Andyanto)

## ABSTRAK

Nama : Andyanto

Program Studi : Fisika

Judul : Studi Eksperimental TiO<sub>2</sub> Nanofluida Terhadap Kinerja Penghantaran Panas *Sintered Wick Heat Pipe*

Saat ini nanofluida menarik perhatian karena memiliki konduktivitas panas yang tinggi dan dapat terdispersi dengan baik. Nanofluida TiO<sub>2</sub>-akuades dipilih sebagai fluida kerja untuk meningkatkan kinerja *heat pipe*. Penelitian dimulai dari pembuatan nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan metode kopresipitasi. Nanopartikel tersebut digunakan untuk pembuatan nanofluida dengan metode dua langkah. Nanofluida akan dikarakterisasi UV-Vis, pengukuran konduktivitas panas dan viskositas. *Heat pipe* dibuat dari pipa tembaga dengan *sintered wick* yang diukur persebaran temperatur pipanya dan dilakukan variasi konsentrasi nanofluida, jumlah fluida kerja, dan sudut kemiringan pipa untuk mencari kinerja *heat pipe* yang terbaik.

TiO<sub>2</sub> nanopartikel yang dibuat memiliki struktur *anatase* dan ukuran kristal 33nm. Hasil pengukuran absorbansi UV-Vis nanofluida menunjukkan absorbansi nanofluida bertambah dengan meningkatnya konsentrasi namun pada konsentrasi 3% dan 5% terjadi penurunan absorbansi. Konduktivitas panas dan viskositas nanofluida meningkat dengan meningkatnya konsentrasi. Hal ini berkaitan dengan teori agregasi.

Kinerja *heat pipe* yang menggunakan nanofluida menunjukkan peningkatan dengan meningkatnya konsentrasi namun pada konsentrasi 3% dan 5% kinerja *heat pipe* lebih rendah dari 1% seperti pada pengukuran absorbansi UV-Vis. Untuk membuktikan pengaruh agregasi dilakukan pengukuran temperatur *heat pipe* yang sudah didiamkan selama satu bulan dan diperoleh hasil menyerupai fluida dasar. Variasi sudut tidak menunjukkan perubahan yang signifikan dan jumlah fluida kerja yang terbaik adalah 60%.

Kata kunci: nanofluida, TiO<sub>2</sub>, konduktivitas panas, viskositas, *heat pipe*, agregasi

## ABSTRACT

Name : Andyanto  
Study Program : Physics  
Judul : Experimental Study of TiO<sub>2</sub> Nanofluid to Sintered Heat Pipe Thermal Performance

Nanofluid attracted a great attention because it has high thermal conductivity and can be well dispersed. Nanofluid TiO<sub>2</sub>-distilled water was selected as the working fluid to improve the kinerjance of *heat pipes*. The study started from the manufacture of TiO<sub>2</sub> nanoparticles with coprecipitate method. The nanoparticles will be used to manufacture nanofluid with two-step method and they will be characterized with UV-Vis, and measured thermal conductivity and viscosity. *Heat pipe* created using copper pipe with sintered wick and would measured the temperature distribution of pipes varying nanofluid concentration, the amount of the working fluid, and the tilt angle of the pipe to find the best kinerjance of *heat pipes*.

TiO<sub>2</sub> nanoparticles were *anatase* structure with crystallite size 33nm. The UV-Vis of nanofluida showed the absorbance of nanofluid increased with increasing concentration but the concentration of 3% and 5% declined in absorbance. Nanofluid thermal conductivity and viscosity increases with increasing concentration. All this relates to the occurrence of aggregation.

Kinerjance of *heat pipe* that uses nanofluida showed an increase with increasing concentration but the concentration of 3% and 5% showed *heat pipe* kinerjance were lower than 1% as it did in the measurement of UV-Vis absorbance. To proved aggregation, *heat pipe* allowed to stand for 1month and measured the temperature of the *heat pipe* and obtained results resemble basic fluid. Effect of tilt variation was insignificant and the influence of variations amount of the optimal working fluid at 60%.

Keywords: nanofluid, TiO<sub>2</sub>, thermal conductivity, viscosity, *heat pipe*, aggregation

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....</b>	<b>III</b>
<b>HALAMAN PENGESAHAN .....</b>	<b>IV</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>V</b>
<b>HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....</b>	<b>VII</b>
<b>ABSTRAK.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>IX</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>X</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>XI</b>
<b>BAB 1_PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
<b>BAB 2_TEORI DASAR.....</b>	<b>4</b>
<b>BAB 3 METODE PENELITIAN .....</b>	<b>13</b>
3.1 PROSES SINTESA NANOPARTIKEL TiO <sub>2</sub> .....	13
3.2 KARAKTERISASI NANOPARTIKEL TiO <sub>2</sub> .....	14
3.3 PROSES SINTESA NANOFUIDA TiO <sub>2</sub> .....	15
3.4 KARAKTERISASI NANOFUIDA TiO <sub>2</sub> .....	15
3.5 PROSES PEMBUATAN <i>HEAT PIPE</i> .....	17
3.6 PROSES PENGAMBILAN DATA <i>HEAT PIPE</i> .....	18
<b>BAB 4_HASIL DAN DISKUSI .....</b>	<b>21</b>
<b>BAB 5_KESIMPULAN .....</b>	<b>52</b>
<b>DAFTAR ACUAN .....</b>	<b>55</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. Hasil SEM serbuk tembaga (MHC Industrial Co., LTD) sebelum dilakukan proses sinter.....	18
Gambar 2. <i>Set up</i> eksperimen pengambilan data distribusi temperatur <i>heat pipe</i> .....	19
Gambar 3. Posisi titik-titik pengukuran <i>heat pipe</i> .....	20
Gambar 4. Kurva difraksi sinar X sampel nanopartikel TiO <sub>2</sub> .....	21
Gambar 5. Kurva spektrum reflektansi UV-Vis sampel nanopartikel TiO <sub>2</sub> .....	24
Gambar 6. Spektrum ESR sampel nanopartikel TiO <sub>2</sub> .....	25
Gambar 7. Spektrum UV-Vis Nanofluida TiO <sub>2</sub> -akuades dengan variasi konsentrasi .....	27
Gambar 8. Konduktivitas panas nanofluida TiO <sub>2</sub> dengan variasi konsentrasi .....	30
Gambar 9. Pengaruh agregasi terhadap konduktivitas sebagai fungsi waktu [67].....	35
Gambar 10. Viskositas nanofluida TiO <sub>2</sub> -akuades dengan variasi konsentrasi.....	37
Gambar 11. Distribusi temperatur <i>heat pipe</i> dengan variasi konsentrasi pada sudut 0 <sup>0</sup> dan jumlah fluida kerja 60% dan daya untuk <i>heater</i> 30watt .....	41
Gambar 12. Distribusi temperatur <i>heat pipe</i> dengan variasi konsentrasi pada sudut 45 <sup>0</sup> dan jumlah fluida kerja 60% dan daya untuk <i>heater</i> 20watt .....	42
Gambar 13. Hasil SEM <i>Sintered Wick Heat pipe</i> dengan konsentrasi nanofluida 0.5% vol.....	45
Gambar 14. Hasil analisis kuantitatif dan kualitatif (EDX) <i>sintered wick heat pipe</i> dengan konsentrasi nanofluida 0.5% vol .....	46
Gambar 15. Degradasi kinerja pada <i>heat pipe</i> (konsentrasi 0.5% vol, jumlah fluida kerja 60%, sudut 45 <sup>0</sup> , daya 20W) .....	47
Gambar 16. Distribusi temperatur <i>heat pipe</i> dengan variasi sudut pada konsentrasi 5% , jumlah fluida kerja 60% dan daya untuk <i>heater</i> 30watt .....	48
Gambar 17. Distribusi temperatur <i>heat pipe</i> dengan variasi sudut pada konsentrasi 0.05% , jumlah fluida kerja 80% dan daya untuk <i>heater</i> 20watt .....	49
Gambar 18. Distribusi temperatur <i>heat pipe</i> dengan variasi jumlah fluida kerja pada konsentrasi 0.05% , sudut 45 <sup>0</sup> dan daya untuk <i>heater</i> 30watt .....	50
Gambar 19. Distribusi temperatur <i>heat pipe</i> dengan variasi jumlah fluida kerja pada konsentrasi 1% , sudut 45 <sup>0</sup> dan daya untuk <i>heater</i> 30watt .....	51

## BAB 1

### PENDAHULUAN

Di zaman modern ini, peralatan elektronik yang dahulu berukuran besar sudah bisa dibuat berukuran sangat kecil dengan aplikasi yang lebih beragam. Namun salah satu kendala yang selalu ditemui adalah kenaikan temperatur. Sebagai contoh, CPU generasi Pentium-IV dapat menghasilkan panas hingga 30 Watt. Sedangkan, CPU dengan generasi setelahnya dapat menghasilkan panas lebih dari 35 Watt, bahkan mencapai 130 Watt. Alat pendingin yang umum digunakan, seperti kipas tidak lagi efisien. Nanofluida yang memiliki sifat penghantaran panas yang lebih baik diharapkan menjadi solusi dari masalah ini.

Nanofluida merupakan sebuah fluida atau cairan yang dibuat dengan cara mendispersikan partikel berukuran nano (berkisar antara 1 – 100 nm) ke dalam fluida dasar yang umum digunakan seperti air, oli, *ethylene glycol*. Konduktivitas panas yang tinggi dan sifat konveksi fluida menjadi keunggulan dari nanofluida. Pemilihan ukuran nano pada partikel yang dijadikan bahan utama dalam proses dispersi juga didasarkan pada studi para peneliti sebelumnya. Penggunaan partikel berukuran nano bertujuan untuk mempermudah proses pendispersian ke dalam fluida dasarnya guna mendapatkan nanofluida yang lebih homogen. Selain itu, karena ukuran partikelnya yang sangat kecil, nanofluida yang didapatkan tidak mudah menggumpal dan mengendap (agregasi) dalam jangka waktu tertentu. Akan tetapi jenis partikel yang akan didispersikan pada fluida dasar juga akan mempengaruhi proses agregasi dari nanofluida. Terjadinya pengendapan partikel pada fluida pendingin ini tentunya membawa dampak yang merugikan pada efektivitas sistem.

Penelitian intensif mengenai nanofluida dimulai oleh peneliti Choi dkk [1]. Nanofluida ini mempunyai sifat-sifat yang berbeda dibandingkan dengan sifat-sifat

yang dimiliki oleh fluida dasar (*base fluid*). Sifat-sifat seperti *transfer* panas dan viskositas dari nanofluida misalnya, mengalami perubahan dibandingkan sifat fluida dasarnya. Berdasarkan hasil penelitian Yu et al. [2], nanofluida menunjukkan peningkatan dalam hal konduktivitas panas. Hal ini ditunjukkan dengan adanya *transfer* panas yang lebih baik dari fluida dasarnya. Gallego et al. [3] melakukan penelitian nanofluida dengan melihat viskositas dan kestabilan nanofluida dan didapat nilai viskositas yang lebih tinggi dari prediksi perhitungan viskositas model Einstein.

Pada penelitian ini nanofluida akan diaplikasikan sebagai fluida kerja dari *heat pipe*. Aplikasi nanofluida pada *heat pipe* sudah banyak diteliti. Shun-Weng Kang et al. [4] menggunakan nanofluida perak-akuades dan didapat peningkatan kinerja *heat pipe* seiring peningkatan konsentrasi. Peningkatan tersebut juga didukung oleh hasil penelitian Putra et al. [5]. Sedangkan penelitian nanofluida yang dilakukan Saleh et al. [6] melakukan pengukuran-pengukuran spektroskopi terhadap nanopartikel ZnO dan nanofluidanya untuk melihat pengaruh-pengaruh dari nanopartikel terhadap konduktivitas panas dan aplikasinya dalam *heat pipe*. Penggunaan nanofluida yang optimum sebagai fluida kerja *heat pipe* diharapkan bisa diperoleh dengan variasi-variasi yang dilakukan.

Untuk percobaan ini akan dipilih nanofluida TiO<sub>2</sub> dengan fluida dasar akuades. Akuades dipilih sebagai fluida dasar karena akuades merupakan fluida yang sangat umum dan menurut Calvin [7] rentang temperatur operasional akuades adalah 30<sup>0</sup>C-200<sup>0</sup>C. Temperatur ini cukup signifikan untuk digunakan pada *heat pipe* sebagai pendingin elektronik. Nanopartikel TiO<sub>2</sub> dipilih karena TiO<sub>2</sub> merupakan logam oksida yang bisa didispersikan dengan akuades dan jumlahnya cukup banyak di alam.

Penelitian ini bersifat eksperimental untuk menentukan kinerja *heat pipe* terbaik dengan nanofluida TiO<sub>2</sub>-akuades sebagai fluida kerja. Metode penelitian dimulai dari sintesa nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan cara kopresipitasi dan dilakukan karakterisasi untuk melihat karakter-karakter dari nanopartikel dengan EDX, XRD, UV-Vis, dan ESR. Nanopartikel yang sudah dikarakterisasi kemudian akan

digunakan untuk pembuatan nanofluida dengan metode dua langkah dan dilakukan karakterisasi antara lain: UV-Vis, pengukuran konduktivitas panas dan viskositas. Nanofluida yang sudah selesai dikarakterisasi kemudian digunakan sebagai fluida kerja pada *heat pipe* sebagai alat pendingin. *Heat pipe* yang digunakan adalah pipa tembaga dengan proses *sinter* pada serbuk tembaga untuk membentuk *wick*-nya. Terakhir akan dilakukan pengukuran pada persebaran temperatur dinding pipa pada bagian-bagian tertentu dan dilakukan variasi konsentrasi nanofluida, jumlah fluida kerja, dan sudut kemiringan pipa untuk mencari kinerja *heat pipe* yang terbaik.



## BAB 2

### TEORI DASAR

Perkembangan nanoteknologi telah membawa perubahan yang sangat besar di bidang sains, kesehatan, teknologi dan lain sebagainya. Salah satu yang menarik untuk diteliti adalah nanofluida sebagai fluida penghantar panas. Nanofluida dibuat dengan mendispersikan nanopartikel (<100nm) ke dalam fluida [8] sehingga diperoleh fluida yang memiliki konduktivitas panas yang lebih tinggi dan memiliki kestabilan yang baik. Peningkatan konduktivitas panas dan kestabilan dari nanofluida inilah yang membuat nanofluida menjadi salah satu solusi pengganti fluida kerja untuk sistem-sistem pendingin yang akan datang.

Metode yang umum digunakan dalam pembuatan nanofluida adalah metode satu langkah dan metode dua langkah [1]. Metode satu langkah (*one step-method*), adalah metode yang dalam proses pembuatannya langsung menghasilkan nanofluida. Sedangkan metode dua langkah (*two step-method*) diawali dengan proses pembentukan nanopartikel. Metode pembuatan nanopartikel dapat digolongkan menjadi dua yaitu proses fisika dan proses kimia. Proses secara fisika termasuk di dalamnya adalah proses kondensasi *inert* gas yang dikembangkan oleh Granqvist dan Buhrman (1976), metode ini termasuk deposisi uap kimia (CVD), presipitasi kimia, mikroemulsi, semprot termal, dan pirolisis semprot. Sulick pada tahun 1996 mengembangkan sebuah metode sonikimia, metode ini telah dikembangkan untuk membuat suspensi nano partikel besi yang distabilkan oleh asam oleat. Setelah nanopartikel berhasil dibuat, langkah selanjutnya adalah dengan mendispersikan nanopartikel ke dalam fluida dasar.

Pada penelitian ini untuk membuat nanofluida  $\text{TiO}_2$  digunakan metode dua langkah. Pertama  $\text{TiO}_2$  nanopartikel dibuat menggunakan metode kopresipitasi. Metode ini dikenal juga dengan nama proses kimia basah karena endapan yang

diperoleh merupakan kontaminasi dari zat lain yang larut di dalam pelarut. Setelah itu nanopartikel dicampurkan ke dalam akuades dan disonifikasi dengan *ultrasonic probe*. Gallego et al. [3] membuat  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -akuades nanofluida dengan memvariasikan metode dispersinya yaitu: (i) diaduk dengan pengaduk magnetik, (ii) sonifikasi dengan menggunakan *ultrasonic bath*, dan (iii) sonifikasi dengan menggunakan *ultrasonic probe*. Hasilnya menunjukkan metode sonifikasi dengan menggunakan *ultrasonic probe* adalah metode dispersi yang paling baik karena menghasilkan nanofluida yang lebih stabil dibandingkan dua metode lainnya. Hal serupa juga ditunjukkan oleh Nasiri et al. [9] yang membuat nanofluida *carbon nanotube*-akuades dan diperoleh hasil kestabilan nanofluida mempengaruhi nilai konduktivitas panasnya. Percobaan tersebut juga menunjukkan hasil sonifikasi dengan menggunakan *ultrasonic probe* lebih baik dibandingkan dengan *ultrasonic bath*.

Banyak peneliti lain yang sudah melakukan berbagai percobaan untuk mempelajari fenomena pada peningkatan konduktivitas panas nanofluida memperoleh peningkatan yang signifikan. Eastman dan Choi [10] sebagai pelopor nanofluida untuk penghantaran panas memperoleh peningkatan konduktivitas panas hingga 40% untuk nanofluida *Cu-ethylene glycol* pada konsentrasi 0.3% vol. Lee et al. [11] memperoleh peningkatan 20% untuk nanofluida *CuO-ethylene glycol* pada konsentrasi 4% vol. Wang et al. [12] membuat nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -akuades dan mendapatkan kenaikan konduktivitas panas 12% pada konsentrasi 3% vol. Eastman et al. [13] dan Hong et al. [14] melakukan pengukuran konduktivitas panas untuk logam dengan hasil yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan nanofluida menggunakan partikel logam oksida. Nanofluida Eastman meningkat 40% pada konsentrasi 0.3% vol untuk *Cu-ethylene glycol* dan Hong meningkat 18% pada konsentrasi 0.55% vol untuk *Fe-ethylene glycol*.

Banyak peneliti lain seperti Hong, Fedele, Putra, He, Murshed, Wang, Pak, Zhang, dan Tugut [15,16,17,18,19,20,21,22] yang melakukan penelitian  $\text{TiO}_2$  nanofluida dan memperoleh kenaikan pada konduktivitas panasnya. Dari hasil penelitian diketahui nanofluida  $\text{TiO}_2$  tidak memiliki konduktivitas panas terlalu tinggi

bila dibandingkan dengan hasil penelitian-penelitian dengan nanopartikel yang berbeda. Hal ini disebabkan  $\text{TiO}_2$  masuk dalam anggota semikonduktor oksida yang tidak memiliki konduktivitas panas yang terlalu tinggi apabila dibandingkan dengan logam ataupun  $\text{CuO}$ . Namun  $\text{TiO}_2$  memiliki beberapa keuntungan seperti mudah didapat, bisa terdispersi di dalam air, cenderung stabil tanpa memerlukan surfaktan serta tidak berbahaya bagi manusia dan lingkungan. Akuades dipilih sebagai fluida dasar karena merupakan fluida yang sangat umum digunakan sebagai fluida kerja *heat pipe*.

Selain pengaruh dari jenis nanopartikel dan fluida dasar yang digunakan, masih ada beberapa hal yang mempengaruhi kenaikan konduktivitas panas seperti konsentrasi nanofluida, temperatur, ukuran nanopartikel, bentuk nanopartikel atau rasio permukaan, penambahan surfaktan, pengaruh pH, teknik dan lamanya sonifikasi, dan agregasi [1,23]. Variasi konsentrasi dalam nanofluida umumnya menggunakan formulasi fraksi massa atau dengan fraksi volume. Umumnya peneliti-peneliti melakukan variasi konsentrasi untuk melihat peningkatan konduktivitas panas karena cara ini paling sederhana dan tidak membutuhkan alat khusus. Para peneliti [5, 10-22] melakukan variasi konsentrasi yang berbeda-beda dan memperoleh hasil bahwa peningkatan konsentrasi berpengaruh terhadap peningkatan konduktivitas panas. Nilai konduktivitas panas juga dipengaruhi oleh temperatur. Hal ini dibuktikan oleh Das et al. [24] yang menunjukkan peningkatan temperatur mengakibatkan peningkatan konduktivitas panas. Hal serupa juga didukung oleh hasil penelitian Wang et al. dan Zhang et al. [19,21].

Variasi selanjutnya yang juga mempengaruhi nilai konduktivitas panas adalah ukuran dan bentuk nanopartikel. Teng et al. [25] melakukan variasi ukuran rata-rata pada nanopartikel  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (20nm,50nm,dan 100nm) dan diperoleh konduktivitas panas yang optimal pada ukuran rata-rata nanopartikel paling kecil. Namun hasil ini berbeda dengan yang diperoleh Kang dan Saleh [4,6] yang memperoleh hasil lebih tinggi pada ukuran rata-rata partikel yang lebih besar(10 nm & 35 nm dan 18 nm &

23 nm). Meski demikian perubahan ukuran rata-rata nanopartikel tidak memberikan pengaruh yang terlalu besar. Pengaruh bentuk partikel ditunjukkan Elena V et al. [26] yang melakukan pengukuran konduktivitas panas dengan variasi morfologi  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Hasil yang didapat menunjukkan morfologi berpengaruh cukup signifikan terhadap konduktivitas panas, bentuk *spherical* adalah bentuk yang menghasilkan konduktivitas panas optimal namun pada percobaannya Elena menggunakan asam untuk mengubah bentuk nanopartikel, hal ini menjadi bias karena tidak diketahui secara pasti peningkatan konduktivitas panas itu sepenuhnya akibat morfologi atau karena pengaruh pH. Murshed [18] mengamati konduktivitas nanofluida  $\text{TiO}_2$ -akuades yang disintesa dari nanopartikel  $\text{TiO}_2$  dengan struktur *spherical* dan struktur batang (*rod*). Ia memperlihatkan bahwa nanofluida  $\text{TiO}_2$ -akuades dengan nanopartikel batang (*rod*) memiliki nilai konduktivitas panas yang lebih tinggi dibandingkan nanopartikel *spherical*.

Variasi nilai pH dan penambahan surfaktan turut mempengaruhi nilai konduktivitas panas nanofluida. Pada penelitian Wang et al. [27], dengan memvariasikan nilai pH pada nanofluida  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -akuades dan Cu-akuades diperoleh kenaikan konduktivitas panas. Untuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -akuades kenaikan konduktivitas panas optimum didapat pada pH antara 7-8 sedangkan pada Cu-akuades kenaikan optimum didapat pada pH antara 9-10. Pengaruh nilai pH juga diamati oleh Li et al. [28] pada nanofluida Cu-akuades yang menunjukkan kenaikan konduktivitas panas optimum pada pH 8-9. Pengaruh surfaktan terhadap nanofluida umumnya lebih terlihat kepada kestabilan nanofluida namun ternyata kestabilan juga mempengaruhi nilai konduktivitas panas dari nanofluida. Hal ini ditunjukkan Li [28] yang menggunakan *sodium dodecylbenzenesulfonate* (SDBS) sebagai surfaktan pada nanofluida Cu-akuades dan ternyata penggunaan surfaktan meningkatkan konduktivitas panas dan mengurangi viskositas. Namun ada satu hal yang penting dalam penggunaan surfaktan, yaitu ada jumlah optimum dalam penggunaan surfaktan karena apabila berlebih, nilai konduktivitas akan menurun.

Pengaruh terakhir yang akan dibahas adalah agregasi. Ruan dan Jacobi [29] membuat *Multi Wall Carbon Nanotube* dicampur ke dalam *ethylene glycol* mereka lalu mensonifikasi hingga 1335 menit. Hasil yang diperoleh menunjukkan konduktivitas panas akan meningkat dibandingkan yang belum terdispersi secara baik. Prasher et al. [30] mengatakan agregasi mulai terbentuk akibat gaya van der Waals baik itu yang disebabkan temperatur, konsentrasi, ataupun waktu. Beberapa peneliti menganggap agregasi menjadi penyebab utama dari konduktivitas panas karena dengan terjadinya agregasi, akan terbentuk partikel dengan ukuran yang lebih besar dan mengakibatkan terjadinya perkolasi pada pori-pori partikel hasil agregasi. Namun ketika agregasi sudah terlalu banyak, akan terjadi sedimentasi dimana partikel-partikel yang teragregasi menjadi lebih berat dibandingkan sebelumnya dan mengendap ke bawah. Oleh karena itu dari pengaruh agregasi, dapat disimpulkan ada saat di mana diperoleh konduktivitas panas maksimum yaitu saat belum terjadi sedimentasi.

Selain dari hasil eksperimen, banyak pula peneliti yang mempelajari sifat-sifat nanofluida melalui permodelan. Model paling pertama adalah model Maxwell [31] yang menghitung suspensi dari *spherical* partikel. Model Maxwell menunjukkan dengan meningkatnya konsentrasi maka jumlah suspensi akan semakin bertambah dan meningkatkan konduktivitas panas. Model ini kemudian dikembangkan oleh Hamilton-Crosser [32] untuk bentuk-bentuk partikel yang bukan *spherical*. Ada juga model Xie [33] yang menghitung peningkatan konduktivitas panas dari nanofluida dengan memperhitungkan efek ketebalan *nanolayer*, ukuran nanopartikel, fraksi volume, dan rasio konduktivitas panas antara partikel dan fluida. Selain itu ada juga model-model yang dibuat dengan melihat interaksi antar-partikel di dalam nanofluida. *Brownian motion* [34] memodelkan konduktivitas panas nanofluida diperoleh dari konveksi fluida. Mereka mengasumsikan nanopartikel bergerak di dalam fluida yang diasumsikan sebagai medan dengan kecepatan tertentu di dalam fluida dan pergerakan partikel inilah yang nantinya membawa panas. Model lain seperti *Interfacial liquid layering* [35] mencoba menjelaskan peningkatan

konduktivitas panas dengan memodelkan molekul cairan pada permukaan nanofluida membentuk lapisan-lapisan dan memiliki keteraturan yang tinggi, sehingga lapisan-lapisan cairan mungkin memiliki konduktivitas panas yang tinggi. Melalui lapisan-lapisan tersebut dimungkinkan terjadinya *tunneling phonon* dari partikel satu ke partikel yang lain. Model *Near field radiation* [36] mencoba menjelaskan dengan menganggap ketika partikel terpisah tidak jauh satu dengan yang lain, partikel akan meradiasikan panas dari partikel satu ke partikel yang lain.

Dalam penelitian nanofluida yang menjadi pusat perhatian bukan hanya konduktivitas panasnya saja, namun viskositas juga menjadi hal penting dalam penghantaran panas. Pada ilmu konversi energi ada bilangan-bilangan yang digunakan untuk mengetahui koefisien penghantaran panas.  $Nu = \frac{h}{k}$  dimana  $Nu$  adalah bilangan Nusselt,  $h$  adalah koefisien konveksi, dan  $k$  adalah koefisien konduksi. Bilangan Nusselt dapat dituliskan:  $Nu = Re^{0.8} Pr^{0.4}$ . Dengan  $Re$  adalah bilangan Reynold, dan  $Pr$  adalah bilangan Prandelt. Bilangan Reynold inilah yang menunjukkan kontribusi viskositas fluida, yakni dalam bentuk:  $Re = \frac{\rho v L}{\mu}$ ,  $\rho$  adalah massa jenis fluida,  $v$  adalah kecepatan aliran fluida,  $L$  adalah panjang lintasan yang dilewati fluida, dan  $\mu$  adalah viskositas dinamis dari fluida. Dari persamaan di atas tersebut kita bisa melihat dengan meningkatnya viskositas, koefisien penghantaran panas akan berkurang, sebaliknya dengan menurunnya viskositas, maka koefisien penghantaran panas akan bertambah. Berbeda dengan konduktivitas panas yang ingin diperoleh dengan nilai semaksimal mungkin, viskositas yang terlalu tinggi mungkin dapat mengurangi koefisien penghantaran panasnya.

Pengukuran viskositas telah banyak diteliti oleh para peneliti seperti Bobbo [37] dan Fedele [16] yang melakukan pengukuran viskositas nanofluida TiO<sub>2</sub>-akuades. Penelitian mereka menunjukkan nilai viskositas nanofluida lebih tinggi dibandingkan fluida dasarnya. Pengaruh konsentrasi dan temperatur juga diamati pada percobaan tersebut. Di mana viskositas meningkat seiring meningkatnya konsentrasi dan menurun pada kenaikan temperatur. Selain konsentrasi dan

temperatur masih ada faktor-faktor yang mempengaruhi viskositas seperti ukuran rata-rata partikel, pH, penambahan surfaktan, dan faktor-faktor lainnya. Timoveefa et al. [38] melakukan pengukuran viskositas terhadap nanofluida SiC-*ethylene glycol* dicampur dengan akuades dan akuades murni. Variasi yang dilakukan adalah variasi ukuran partikel. Hasil yang diperoleh menunjukkan nanofluida yang memiliki ukuran partikel lebih kecil memiliki viskositas yang lebih tinggi dibandingkan dengan nanofluida dengan ukuran partikel lebih besar. Pengaruh pH diteliti oleh Zhao et al. [39] di mana pada nanofluida dengan partikel berukuran besar ( $>20\text{nm}$ ) tidak ada pengaruh pH pada viskositas. Sedangkan pada partikel berukuran kecil ( $<20\text{nm}$ ) pengaruh pH akan meningkatkan viskositas. Dari hasil penelitian pada pH 5-7 viskositas meningkat dibandingkan pada nilai pH lainnya.

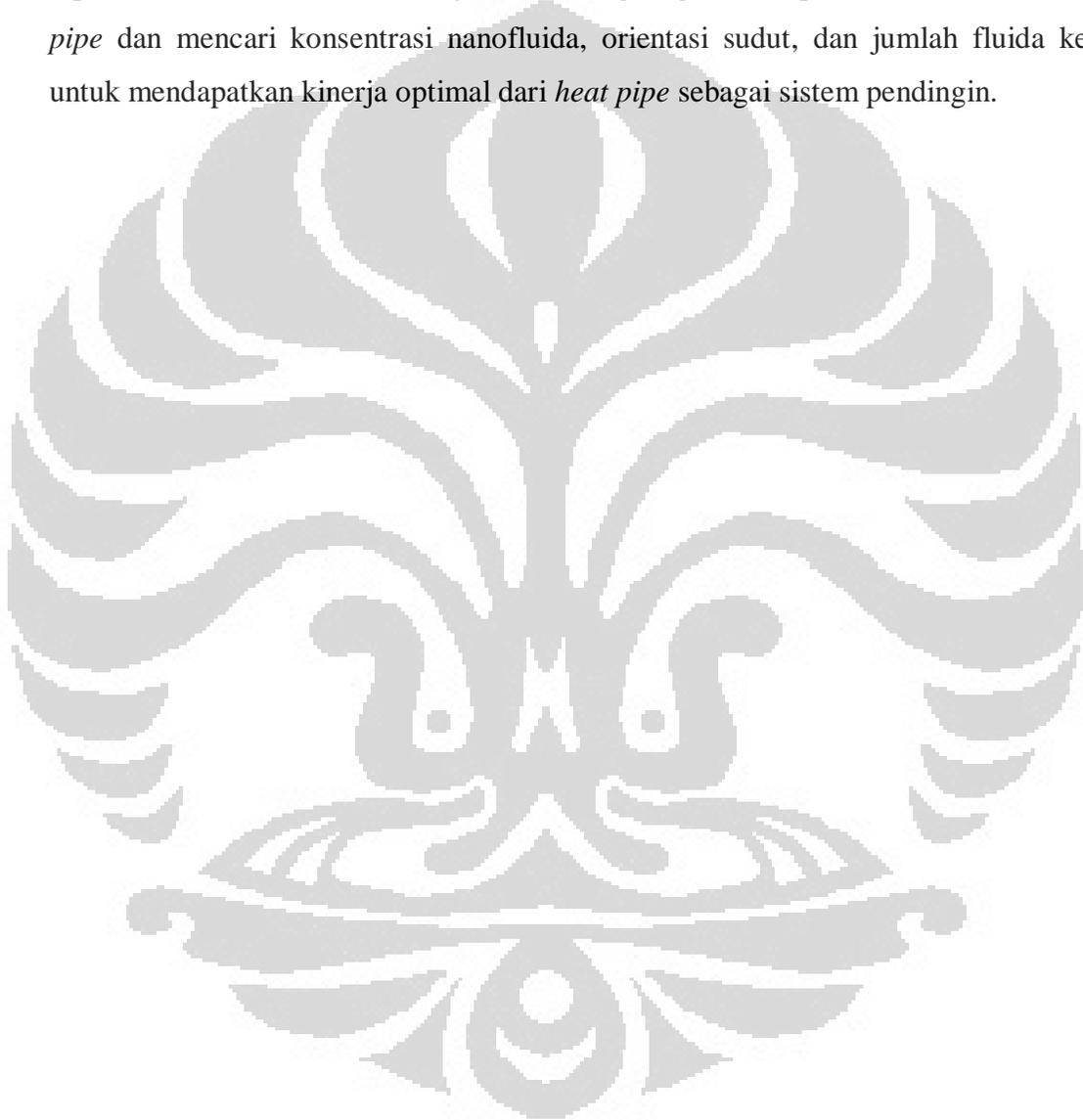
Viskositas juga dipelajari melalui permodelan. Model yang cukup terkenal yaitu model Einstein. Model ini menggambarkan viskositas dari partikel dalam suspensi di mana partikel terdispersi dengan baik dan tidak ada interaksi antara partikel satu dengan partikel lain. Selain model Einstein ada model Nielsen [40] yang juga mencoba mengembangkan model viskositas. Pada model Nielsen, ia mencoba memperhitungkan interaksi antar partikel dengan memperhitungkan faktor fraksi volume maksimum dan faktor konsentrasi partikel dalam suspensi untuk perhitungannya.

Nanofluida yang memiliki konduktivitas panas yang lebih tinggi dapat diaplikasikan sebagai fluida kerja *heat pipe*. Saat ini *heat pipe* mulai banyak digunakan pada sistem pendingin. *Heat pipe* memiliki berbagai keunggulan seperti konduktivitas panas yang tinggi, tidak membutuhkan daya dari luar dan tidak ada bagian mekanis yang bergerak. Di samping itu, *heat pipe* dapat digunakan saat sumber panas dan pelepas panas ditempatkan pada posisi yang berbeda sehingga mampu mencegah panas berpusat di satu titik. Prinsip kerja dari *heat pipe* yaitu perubahan fase [41]. *Heat pipe* terdiri dari tiga bagian utama, yaitu Evaporator (penguap) yang berada pada salah satu ujungnya, pada bagian ini kalor diserap dan cairan diuapkan; kemudian Kondensor (pengembun) yang terletak pada ujung

lainnya, uap diembunkan dan kalor pun dilepaskan; dan terakhir bagian adiabatik yang terletak di antara keduanya. Adiabatik adalah keadaan dimana tidak ada (sangat kecil) kalor yang diserap atau dilepas dari lingkungan sekitarnya. Ketika kalor diserap, cairan dalam pipa menguap, maka cairan menyerap kalor laten penguapan. Perbedaan tekanan antara evaporator dengan kondensor menyebabkan uap mengalir melewati daerah adiabatik menuju kondensor yang mempunyai temperatur lebih rendah. Disini uap mengalami pelepasan kalor laten penguapan, dan berkondensi membentuk fase cair. Kemudian *wick* mengembalikan cairan tersebut menuju evaporator menggunakan prinsip kapilaritas hingga siklus terbentuk terus menerus dengan sendirinya.

Faktor-faktor yang mempengaruhi efisiensi pada *heat pipe* [41] antara lain fluida kerja dan *wick* yang terdapat dalam *heat pipe*. Pada *heat pipe* fluida kerja yang baik adalah fluida yang memiliki konduktivitas panas yang tinggi. Fluida dalam *heat pipe* akan menyerap kalor, cepat-lambatnya penyerapan kalor ini dipengaruhi oleh konduktivitas panas. Selain konduktivitas panas, saat fluida kembali dari kondensor ke evaporator viskositas turut mempengaruhi. Putra, Kang, Tsai, Naphon [5,4,42,43] mengukur kinerja *heat pipe* dengan variasi konsentrasi nanoluida yang menunjukkan peningkatan konduktivitas panas. Dengan meningkatnya konduktivitas panas, kinerja *heat pipe* juga meningkat. Jumlah fluida kerja dalam *heat pipe* juga memiliki peran penting dalam kinerja *heat pipe*. Hal ini ditunjukkan oleh Kempers [44] yang melihat pengaruh jumlah fluida kerja. Faktor lainnya yaitu *wick* yang menjadi media fluida cair bersirkulasi dengan prinsip kapilaritas. Kapilaritas pada *wick* dapat terbentuk karena adanya rongga-rongga. Kempers et al. [44] melakukan variasi pada jumlah *screen mesh wick* pada *heat pipe* dan diperoleh hasil jumlah *screen mesh* sebanyak tiga *layer* yang terbaik. Kemudian ada Kang yang pada dua hasil penelitiannya menggunakan dua jenis *wick* yang berbeda *screen mesh wick* [45] dan *sintered wick* [4] menunjukkan kinerja *heat pipe* lebih baik pada *sintered wick*. Hal ini disebabkan *sintered wick* memiliki rongga-rongga yang lebih banyak sehingga memiliki sifat kapilaritas lebih baik. Adapun faktor-faktor luar seperti sudut *heat pipe* juga

berpengaruh terhadap kinerja *heat pipe*. Sudut *heat pipe* berkaitan dengan gaya gravitasi yang akan membantu fluida yang hendak kembali dari kondensator menuju evaporator [46,43,47]. Penggunaan nanofluida sebagai fluida kerja pada *heat pipe* menjadi hal yang menarik pada penelitian ini. Sifat-sifat nanofluida yang belum dapat diprediksi akan dilihat korelasinya secara langsung dalam aplikasi *sintered wick heat pipe* dan mencari konsentrasi nanofluida, orientasi sudut, dan jumlah fluida kerja untuk mendapatkan kinerja optimal dari *heat pipe* sebagai sistem pendingin.



## BAB 3

### METODE PENELITIAN

Dalam bab ini akan dijelaskan langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian dimulai dari sintesa Nanopartikel TiO<sub>2</sub>, Kemudian dilakukan karakterisasi nanopartikel menggunakan EDX, XRD, UV-Vis, dan ESR. Proses pembuatan nanofluida TiO<sub>2</sub> adalah dengan fluida dasar akuades, pengukuran konduktivitas panas dan viskositas nanofluida disertai karakterisasi UV-Vis. Setelah itu dilakukan pembuatan *heat pipe* dengan *sintered wick* dan pengukuran distribusi temperatur dari dinding-dinding pipa untuk melihat kinerja *heat pipe* sebagai alat penghantar panas.

#### 3.1 Proses Sintesa Nanopartikel TiO<sub>2</sub>

Proses pembuatan nanopartikel TiO<sub>2</sub> menggunakan metode kopresipitasi. Metode ini dikenal juga dengan nama proses kimia basah karena endapan yang akan diperoleh merupakan kontaminasi dari zat lain yang larut di dalam pelarut. Metode kopresipitasi banyak digunakan dalam penelitian karena memiliki beberapa keuntungan antara lain dapat dilakukan beraneka ragam variasi, dapat diproduksi dalam jumlah besar, dan hanya menggunakan alat-alat yang sederhana. TiO<sub>2</sub> sebagai reagen yang digunakan dilarutkan ke dalam akuades dan di-ultrasonik menggunakan *ultrasonic bath* selama 2 jam dengan frekuensi 40kHz. Tujuan dari ultrasonik ini adalah agar reagen tercampur sempurna dan memudahkan reaksi dengan larutan basa. Secara bersamaan, disiapkan pula larutan basa yang didapatkan dengan melarutkan NaOH dalam akuades. Setelah keduanya selesai, larutan reagen dan larutan basa dicampurkan dan diaduk dengan pengaduk magnetik selama 30 menit secara konstan hingga temperatur 80<sup>0</sup>C. Larutan hasil reaksi didinginkan pada temperatur ruang dan didiamkan selama 3 jam hingga diperoleh endapan.

Endapan dari larutan yang diperoleh setelah 3 jam akan dicuci untuk menghilangkan sisa-sisa garam. Pertama, endapan di-*sentrifuge* pada kecepatan 3000rpm selama 15 menit, kemudian sisa-sisa garam dibuang dan dicuci dengan akuades dan di-*sentrifuge* kembali. Setelah itu dicuci sekali lagi dengan campuran etanol dan akuades. Endapan lalu di-*sentrifuge* selama 1 jam dan didiamkan selama 24 jam dengan tujuan agar kristal terbentuk secara perlahan. Terakhir endapan tersebut dikeringkan pada keadaan vakum pada suhu 100<sup>0</sup>C selama 4 jam.

### 3.2 Karakterisasi Nanopartikel TiO<sub>2</sub>

Untuk melihat struktur dan parameter kisi kristal dari nanopartikel digunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) Philips PW 1710 dengan menggunakan sumber radiasi dari berkas CuK $\alpha$  dengan panjang gelombang  $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ , beroperasi pada tegangan 40kV dengan arus 20mA. Spektrum direkam dari 10<sup>0</sup>-80<sup>0</sup>. Data yang diperoleh dari Sinar-X yang terdifraksi oleh bidang kristal tersebut kemudian dianalisis dengan metode perhitungan Rietveld menggunakan program MAUD (*Material Analysis using Diffraction*) untuk mengetahui struktur dan parameter kisi. Metode Rietveld adalah metode penghalusan, metode ini membandingkan antara grafik XRD yang diperoleh dengan *database* yang dijadikan acuan. Perbandingan-pembandingannya adalah posisi puncak-puncak intensitas, *background*, dan bentuk dari puncak-puncak intensitas. Untuk mengetahui ukuran rata-rata kristal, digunakan rumus Debye-Scherrer  $D = \frac{0.9\lambda}{B \cos\theta}$ ,  $\lambda$  adalah panjang gelombang sinar-X, B adalah FWHM(Full Width at Half Maximum), dan  $\theta$  adalah sudut difraksi.

Sifat optis nanopartikel TiO<sub>2</sub> dikarakterisasi dengan menggunakan UV-Vis *spectrophotometer* Shimadzu UV-2450. Pengukuran dilakukan pada temperatur ruang untuk melihat reflektansi dan nilai pita energi nanopartikel. Sampel mula-mula dipadatkan pada *sample holder* dan dipancarkan sinar pada panjang gelombang 200-800 nm. Kurva yang diperoleh menggunakan pembanding BaSO<sub>4</sub> sebagai standar pada cahaya tampak karena nilai *band gap*-nya. Berdasarkan grafik reflektansi nilai

*band gap* bisa diperoleh dengan fungsi Kubelka-Munk  $(R) = \frac{(1-R)^2}{2R}$ , R adalah reflektansi dari sample pada daerah linear dari kurva .

*Electron Spin Resonance* (ESR) digunakan untuk melihat keadaan elektron tidak berpasangan nanopartikel TiO<sub>2</sub> menggunakan JEOL JES-RE1X spektrometer pada frekuensi X-Band (9.3 GHz). Pengukuran dilakukan pada temperatur ruang dengan kuat medan magnet 0.6 T. Berdasarkan grafik yang diperoleh, akan dicari nilai g, dengan rumus  $g = \frac{hv}{\beta H}$  di mana  $h$  adalah konstanta Planck,  $v$  adalah frekuensi gelombang mikro,  $\beta$  adalah *magnetic Bohr*, dan  $H$  adalah nilai tengah medan magnet.

### 3.3 Proses Sintesa Nanofluida TiO<sub>2</sub>

Metode sintesa nanofluida yang digunakan adalah metode dua langkah, metode ini mendispersikan partikel berukuran nano yang akan dipakai ke dalam fluida. Sampel nanopartikel yang telah disintesa dan dikarakterisasi dicampur dengan akuades (fluida dasar) kemudian diaduk secara terus-menerus selama 30 menit pada temperatur ruang dengan menggunakan pengaduk magnetik. Setelah itu sampel akan di ultrasonik selama 1 jam tanpa jeda dengan intensitas maksimum menggunakan *ultrasonik probe* dari Chrome Tech. Tujuan dari ultrasonik ini adalah untuk memecah nanopartikel sehingga bisa diperoleh nanofluida yang homogen dan terdispersi merata. Pada percobaan ini dibuat 6 konsentrasi nanofluida dengan persamaan fraksi volumenya  $\varphi = \frac{v_{Nanopartikel}}{v_{Nanopartikel} + v_{Basefluid}}$ . Variasi konsentrasi yang dibuat antara lain 0.05% Vol, 0.1% Vol, 0.5% Vol, 1% Vol, 3% Vol, 5% Vol.

### 3.4 Karakterisasi Nanofluida TiO<sub>2</sub>

Untuk pengukuran konduktivitas termal, digunakan alat KD2 Decagon (dengan ralat dari alat 5%). Dengan metode sensor *hot wire*, jarum (*wire*) berfungsi sebagai sensor akan mencatat temperatur fluida, kemudian jarum tersebut akan memberikan panas selama beberapa saat dan jarum tersebut akan merespon kembali ketika suhu fluida sudah kembali ke temperatur awal. Metode perhitungan ini dinamakan dilatasi waktu, waktu untuk kembali kepada suhu awal. Ukuran jarum

adalah dengan diameter 0.9 mm dan panjang 60 mm. Untuk memperkecil ralat pada saat pengukuran, digunakan gelas beaker yang berdiameter kecil. Kemudian gelas beaker tersebut akan dijaga temperaturnya secara konstan dengan menggunakan *circulating thermostatic bath* (CTB) HUBER K12 pada suhu 25<sup>0</sup>C. Pengukuran dilakukan sebanyak 20 kali untuk memperkecil kesalahan dalam pengambilan data. Alat ukur konduktivitas panas KD2 sudah banyak digunakan sebagai alat ukur konduktivitas panas untuk nanofluida. Jacopo Buongiorno [48] melakukan kerja sama dengan 38 organisasi (universitas dan lembaga riset) untuk melakukan pengukuran konduktivitas panas nanofluida yang masih dianggap belum konsisten. Salah satu yang menyebabkan ke-tidakkonsistenan tersebut adalah metode pengukuran konduktivitas panas. KD2 digunakan oleh dua lembaga riset dan memberikan hasil yang tidak jauh berbeda bila dibandingkan dengan pengukuran menggunakan *Transient Hot Wire* pada temperatur yang sama. C.S. Jwo [49] juga membandingkan KD2 dengan alat ukur konduktivitas panas buatannya yang mengembangkan *Transient Hot Wire* dengan mengganti sumbu (*wire*) nya. Hasilnya menunjukkan nilai yang mirip dengan perbedaan hanya sebesar 5%.

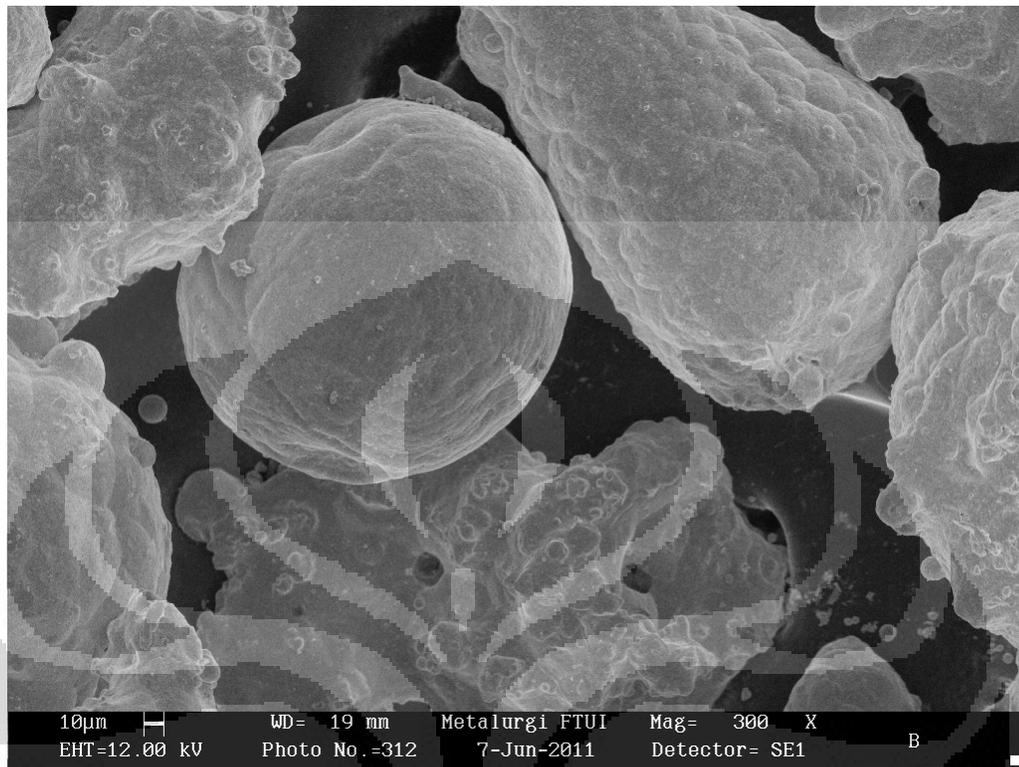
Kemudian dilakukan pengukuran Viskositas untuk mengetahui kekentalan fluida yang menyatakan besar-kecilnya gesekan dalam fluida yang mempengaruhi pergerakan fluida tersebut. Pengukuran dilakukan dengan alat viskometer LV-DVE dari Brookfield Engineering Inc. dengan metode *rotational type* dengan tambahan UL-Adapter sehingga dapat dilakukan pengukuran viskositas hingga nilai minimal 1cP. Pengukuran tersebut dilakukan pada kecepatan putaran 100 RPM. Sampel yang akan diukur dimasukkan ke dalam *sample chamber* yang dihubungkan dengan CTB agar suhu saat pengukuran bisa dijaga konstan dan bisa diukur pada temperatur yang diinginkan yaitu 25<sup>0</sup>C.

Karakterisasi juga dilakukan untuk melihat sifat optis nanofluida untuk setiap konsentrasi dengan menggunakan UV-Vis *spectrophotometer* Shimadzu UV-2450. Pengukuran ini dilakukan dengan melihat absorbansi nanofluida yang dipancarkan

dengan sinar pada panjang gelombang 200-800 nm. Untuk reflektansi ini juga menggunakan BaSO<sub>4</sub> sebagai referensi. Kurva yang diperoleh akan digunakan untuk melihat kestabilan nanofluida dengan variasi konsentrasi dan memastikan komposisi nanofluida.

### 3.5 Proses Pembuatan *Heat pipe*

*Heat pipe* yang digunakan adalah pipa tembaga yang dibuat lurus dengan ukuran panjang 200 mm dan diameter dalamnya 6 mm. Bagian dalam pipa menggunakan *sintered wick* yang dibuat dari serbuk tembaga yang di-*sinter*. Serbuk tembaga yang digunakan memiliki kemurnian 99% dan berukuran 300 µm (MHC Industrial Co., LTD) di-*sinter* pada suhu 920<sup>0</sup>C dengan waktu tahan selama 120 menit (*Heating Rate Point:8<sup>0</sup>C/mnt*). Setelah itu sampel langsung dikeluarkan dan didinginkan tanpa proses *quenching*. Tebal *sinter wick* yang diperoleh adalah 1.2 mm. Proses *sinter* ini menyebabkan atom-atom dari serbuk tembaga yang sudah dimampatkan dalam pipa akan saling berikatan dan membentuk padatan yang berpori-pori. *Heat pipe* yang sudah jadi di salah satu ujungnya ditutup dengan katup nepel untuk memasukkan fluida kerja dan satu lagi ditutup agar tidak ada fluida yang keluar. Gambar 1. menunjukkan hasil SEM dari serbuk tembaga sebelum di-*sinter*. Terlihat ukuran powder berukuran 300 µm dan berbentuk *spherical*.



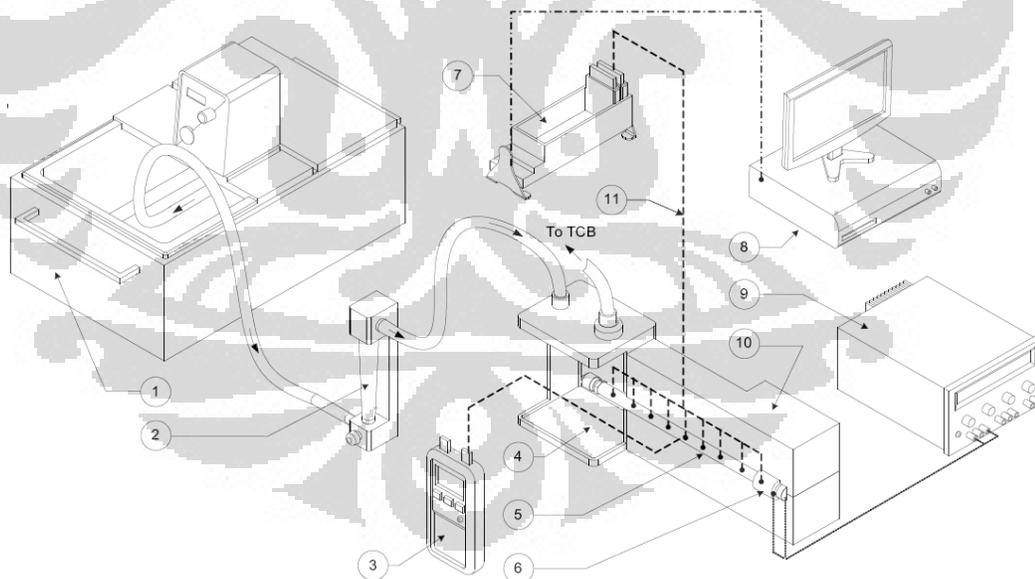
**Gambar 1. Hasil SEM serbuk tembaga (MHC Industrial Co., LTD) sebelum dilakukan proses sinter**

### **3.6 Proses pengambilan data *heat pipe***

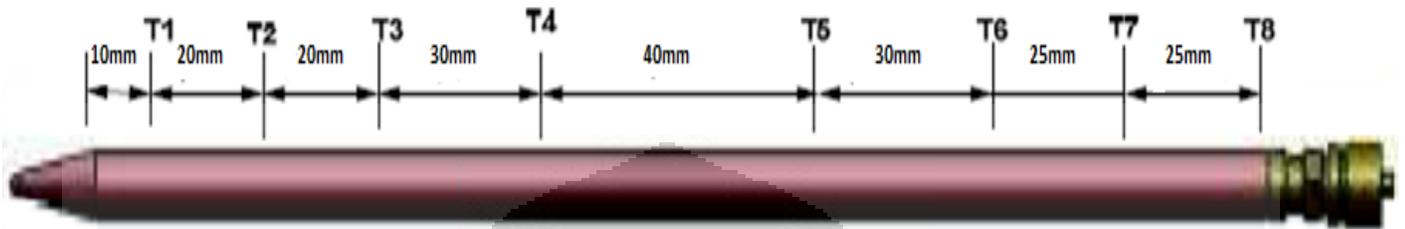
Kinerja *heat pipe* sebagai alat penghantar panas dilihat dari persebaran temperaturnya. Untuk percobaan ini dilakukan pengukuran temperatur pada 8 titik (tiga evaporator, dua adiabatik, tiga kondensor). Bagian evaporator: 10 mm, 30 mm, 50 mm; bagian adiabatik: 80 mm, dan 120 mm; bagian kondensor: 150 mm, 175 mm, 200 mm. Bagian evaporator dililit dengan kabel pemanas dengan variasi daya ( $Q$ ) dari DC-*power supply* yang divariasikan pada 10 Watt, 20 Watt dan 30 Watt. Sedangkan bagian kondensor terhubung dengan CTB yang dioperasikan pada suhu 25 °C. Untuk menghindari kehilangan kalor pada saat pengambilan data, *heat pipe* diisolasi menggunakan *fiberglass wool* dan kotak *polyurethane* yang merupakan material berkonduktivitas panas rendah (isolator). Pengambilan data temperatur menggunakan *thermocouple* jenis K pada posisi yang sudah disebutkan. *Thermocouple* dihubungkan dan diproses menggunakan *Data Acquisition (DAQ)*.

**Universitas Indonesia**

DAQ adalah alat yang mampu mengubah kondisi fisik (temperatur, tegangan, arus, tekanan, dan lainnya) menjadi sinyal numerik yang mampu dimanipulasikan oleh komputer. DAQ yang digunakan adalah NI cDAQ-9172 dan modul NI 9211 dari National Instrument dengan pengolah data berupa *software Labview 8.5*. Adapun variasi tambahan yang dilakukan antara lain variasi sudut kemiringan *heat pipe* adalah  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$  dan variasi jumlah fluida kerja adalah 40%, 60%, 80%. Pengukuran untuk melihat pengaruh agregasi dilakukan juga yaitu *heat pipe* yang sudah didiamkan selama 1 bulan akan diukur kembali distribusi temperaturnya. Pengambilan data dilakukan selama kurang lebih 1 jam agar diperoleh keadaan stabil pada distribusi panasnya. Data yang diambil adalah rata-rata dari 50 data terakhir. Gambar 2. menunjukkan susunan alat eksperimen dalam pengambilan data distribusi temperatur *heat pipe*, (1)CTB, (2)Flowmeter, (3)Multimeter, (4)Water Jacket, (5)Heat pipe, (6)Element Heater, (7)NI Instrument, (8)CPU, (9)Power Supply, (10)Polyurethane, (11)Thermocouple [5]. Gambar 3. Menunjukkan posisi pengukuran temperatur dengan menggunakan *thermocouple*.



**Gambar 2.** *Set up* eksperimen pengambilan data distribusi temperatur *heat pipe*



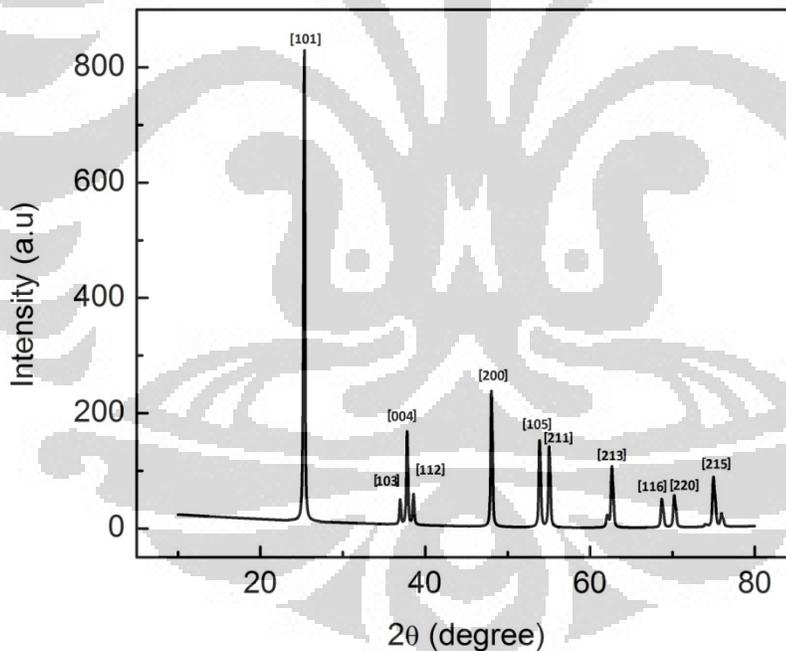
**Gambar 3. Posisi titik-titik pengukuran *heat pipe***

Struktur pori-pori dari *sinter wick* sangat berpengaruh dalam kinerja *heat pipe*, namun nanofluida yang menggumpal bisa saja menempel pada pori-pori dan mempengaruhi kinerja *heat pipe*. Oleh karena itu setelah pengambilan data *heat pipe*, pipa dipotong dan diambil *wick* bagian evaporator untuk dilihat struktur pori-pori *sinter wick* dan analisis kuantitatif dan kualitatif nanofluida yang menempel menggunakan SEM (*Scanning Electron Microscope*) dan EDX (*Energy Dispersive X-Ray*). SEM dan EDX menggunakan JEOL JSEM6520LV dengan voltase 20kv pada keadaan *low vacuum* untuk pengambilan gambar dan analisis kuantitatif dan kualitatif. *Wick* yang telah digunakan ditembak oleh elektron sehingga mengemisikan sinar X yang kemudian ditangkap oleh detektor yang dikonversi dan disimpan dalam bentuk sinyal listrik. EDX dapat menganalisis komposisi dan menunjukkan presentase jumlah unsur dari sampel. Komposisi sampel bisa diketahui berdasarkan posisi dari puncak yang ada pada spektrum dan presentase didapat dari tingginya puncak. Sedangkan untuk proses SEM, detektor akan menangkap hasil *secondary electron*.

## BAB 4

### HASIL DAN DISKUSI

Analisis struktur dan parameter kisi kristal dari nanopartikel menggunakan *X-Ray Diffraction (XRD)* Philips PW 1710 dengan sumber radiasi menggunakan berkas  $\text{CuK}\alpha$  dengan panjang gelombang  $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ , spektrum direkam dari  $10^0$ - $80^0$ . Dengan memanfaatkan sinar-X yang terdifraksi oleh bidang kristal, spektrum pada Gambar 4 diperoleh. Pada Gambar tersebut terlihat pola difraksi dari sampel nanopartikel  $\text{TiO}_2$  yang disintesis dengan metode kopresitipitasi.



**Gambar 4.** Kurva difraksi sinar X sampel nanopartikel  $\text{TiO}_2$

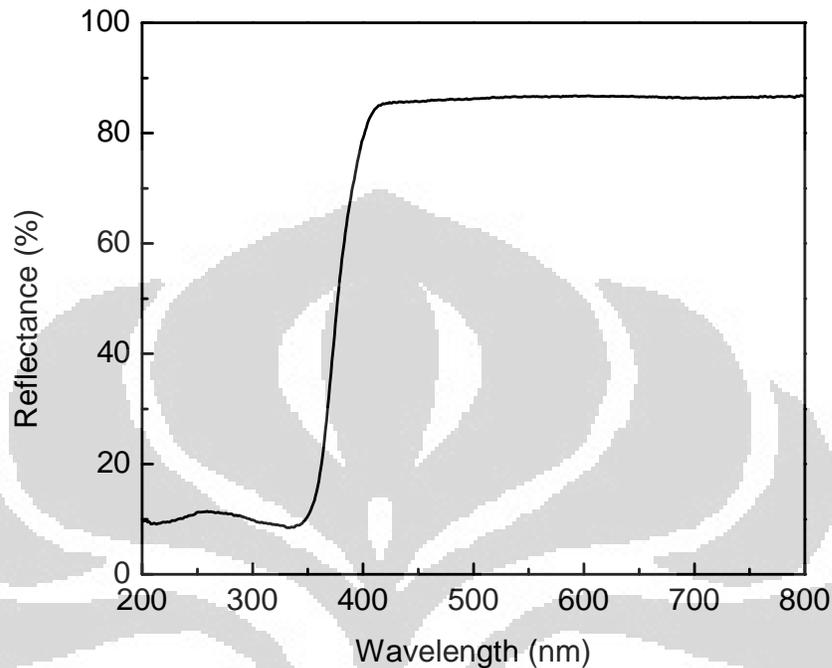
Dari semua puncak yang terekam pada sudut  $20^{\circ}$ - $80^{\circ}$ , hasil yang diperoleh adalah nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan struktur *anatase*. Struktur *anatase* terlihat jelas pada posisi puncak-puncak difraksi yaitu:  $25.34^{\circ}$  (puncak utama),  $36.96^{\circ}$ ,  $37.82^{\circ}$ ,  $38.57^{\circ}$ ,  $48.02^{\circ}$ ,  $53.87^{\circ}$ ,  $55.04^{\circ}$ ,  $62.60^{\circ}$ ,  $68.72^{\circ}$ ,  $70.24^{\circ}$ , dan  $74.96^{\circ}$  yang berturut-turut berhubungan dengan bidang (101), (103), (004), (112), (200), (105), (211), (213), (116), (220), dan (215). Hasil serupa juga diperoleh peneliti lain seperti Dong Fang [50] yang membuat nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan metode *electrolytic anodization* yang diberikan perlakuan panas (*annealing*) yang berbeda-beda pada temperatur  $450^{\circ}\text{C}$ ,  $600^{\circ}\text{C}$ ,  $800^{\circ}\text{C}$ , dan  $900^{\circ}\text{C}$  selama 2 jam. Hasil yang diperoleh adalah nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan struktur *anatase* pada temperatur  $450^{\circ}\text{C}$ . Pada suhu  $600^{\circ}\text{C}$  struktur yang diperoleh mulai berubah menjadi struktur antara *anatase* dan *rutile* dan untuk temperatur  $900^{\circ}\text{C}$  struktur TiO<sub>2</sub> yang diperoleh adalah *rutile*. Dong Fang menyebutkan bahwa kekosongan oksigen akibat pemanasan yang menjadi penyebab perubahan struktur tersebut. Peneliti lain, Azuchi Harano [51] membuat nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan metode *laser ablation* dari sebuah bahan (*solid rod*) yang diletakkan dalam suatu ruang dan diberikan gas kemudian ditembakkan dengan laser akan menghasilkan nanopartikel TiO<sub>2</sub>. Untuk mendapatkan nanopartikel TiO<sub>2</sub> yang bervariasi Harano melakukan variasi pada bahan dan gas yang ditunjukkan pada Tabel 1. dan dari hasil tersebut disimpulkan bahwa gas oksigen sangat besar pengaruhnya pada pembentukan struktur *anatase* dari nanopartikel TiO<sub>2</sub>.

Tabel 4.1. Hasil percobaan Azuchi Harano [51]

Bahan( <i>solid rod</i> )	Gas	Hasil (nanopartikel)
Ti	He	Ti
Ti	He+O <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub> <i>anatase</i>
TiO <sub>2</sub> ( <i>rutile</i> )	He	TiO <sub>2</sub> <i>rutile</i> dan sedikit <i>anatase</i>
TiO <sub>2</sub> ( <i>rutile</i> )	He+O <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub> <i>rutile/anatase</i> =1.5
TiO <sub>2</sub> ( <i>anatase</i> )	He	TiO <sub>2</sub> <i>rutile/anatase</i> =1.0
TiO <sub>2</sub> ( <i>anatase</i> )	He+O <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub> <i>rutile/anatase</i> =0.5

Melalui hasil difraksi sinar X, diperoleh juga nilai-nilai parameter kisi:  $a=3.785\text{\AA}$  dan  $c=9.155\text{\AA}$ . Nilai parameter kisi diperoleh dengan analisis metode perhitungan Rietveld menggunakan program MAUD. Nilai tersebut juga diperoleh oleh Peters et al. dan Burdett et al yang disebutkan oleh Dorian [52] pada *review*-nya. Dan dari FWHM didapatkan ukuran rata-rata kristal, menggunakan rumus Debye-Scherrer  $D = \frac{0.9\lambda}{B\cos\theta}$  dimana  $\lambda$  adalah panjang gelombang sinar X, B adalah FWHM(*Full Width at Half Maximum*), dan  $\theta$  adalah sudut difraksi. Ukuran rata-rata kristal yang diperoleh adalah 33 nm.

Sifat optis nanopartikel  $\text{TiO}_2$  dikarakterisasi dengan menggunakan UV-Vis *spectrophotometer* Shimadzu UV-2450. Gambar 5. menunjukkan kurva reflektansi dari sampel ketika dipancarkan sinar dengan panjang gelombang pada rentang 200-800 nm (ultraviolet hingga cahaya tampak), pengukuran dilakukan pada temperatur ruang. Pada umumnya pengukuran UV-Vis bertujuan untuk mengkonfirmasi komposisi dari sampel yang dimiliki dengan mengekstrapolasi daerah linear dari kurva atau bisa dilihat dari nilai *band gap* yang didapat dengan fungsi Kubelka-Munk  $F(R) = \frac{(1-R)^2}{2R}$  di mana nilai R adalah reflektansi dari sample pada daerah linear kurva.



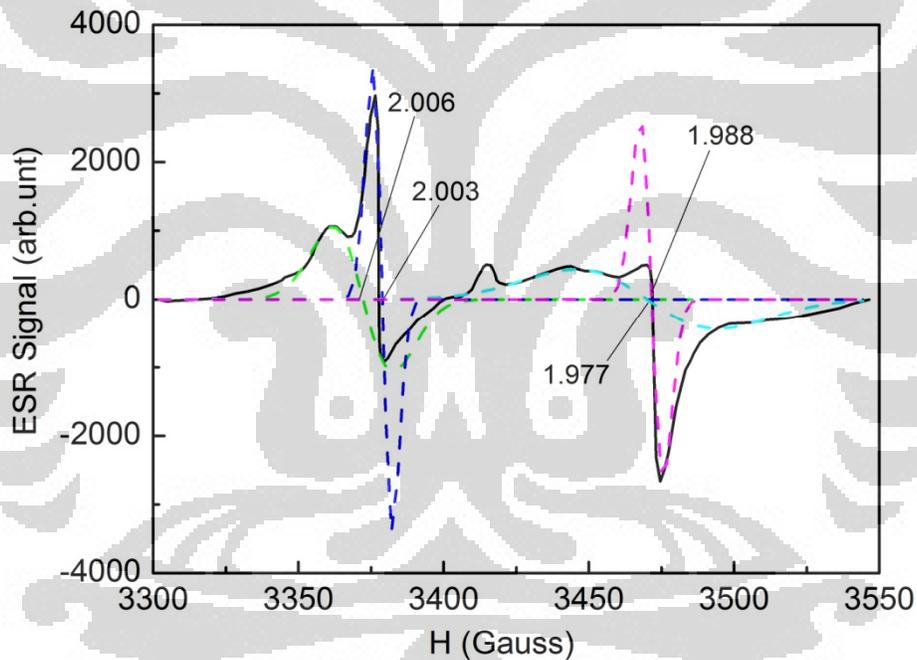
**Gambar 5. Kurva spektrum reflektansi UV-Vis sampel nanopartikel TiO<sub>2</sub>**

Dari kurva, pada panjang gelombang 800-400nm didapat nilai reflektansi yang tinggi kemudian terjadi penurunan nilai reflektansi yang menunjukkan tidak cukupnya energi untuk memungkinkan terjadinya transisi elektron. Daerah linear kurva terdapat pada panjang gelombang 385.8 nm dan nilai *band gap*-nya adalah 3.2 eV. Hasil ini sesuai untuk nanopartikel TiO<sub>2</sub> dengan struktur *anatase* hasil dari penelitian Peters et al. dan Burdett et al yang disebutkan oleh Dorian [52].

Pengukuran selanjutnya adalah pengukuran ESR (*Electron Spin Resonance*) menggunakan JEOL JES-RE1X spektrometer pada frekuensi X-Band (9.3 GHz) dengan kuat medan magnet 0.6 T. ESR digunakan untuk melihat keadaan dari elektron tidak berpasangan dari nanopartikel TiO<sub>2</sub>. Gambar 6. menunjukkan spektrum ESR dari sampel nanopartikel TiO<sub>2</sub>. Analisis dilakukan dengan bantuan perangkat lunak *PeakFit* karena spektrum yang terbentuk adalah superposisi dari 4 buah sinyal yang didapat memiliki nilai  $g=2.006$ ,  $g=2.003$ ,  $g=1.988$ ,  $g=1.977$ . Nilai  $g$  tersebut

**Universitas Indonesia**

dicocokkan dengan studi literatur, nilai  $g$  sekitar 2 menunjukkan elektron oksigen dan di bawah 2 menunjukkan menunjukkan elektron Ti. Hasil penelitian Gray et al. [53,54,55] yang mencoba membuat *degussa* P25 (pada tahap peralihan fase dari *anatase* menjadi *rutile*) dari ketiga hasil penelitian tersebut didapat nilai yang mendekati di mana nilai  $g=2.006$  menunjukkan elektron tidak berpasangan dari oksigen berada pada *surface hole*,  $g=2.003$  menunjukkan elektron bebas dari  $O^{2-}$ . Sedangkan nilai  $g=1.988$  menunjukkan electron dari Ti pada kisi *anatase*, nilai  $g$  ini yang umum ditunjukkan pada hasil ESR  $TiO_2$  *anatase*. Nilai  $g=1.977$  menunjukkan elektron tidak berpasangan pada fase antara *anatase* dan *rutile*.



**Gambar 6. Spektrum ESR sampe nanopartikel  $TiO_2$**

Sintesis nanopartikel  $TiO_2$  telah berhasil dilakukan dan dibuktikan melalui karakterisasi EDX, XRD, UV-Vis, dan ESR. Nanopartikel  $TiO_2$  yang diperoleh adalah  $TiO_2$  dengan struktur *anatase*, dengan ukuran rata-rata kristal 33 nm dan

**Universitas Indonesia**

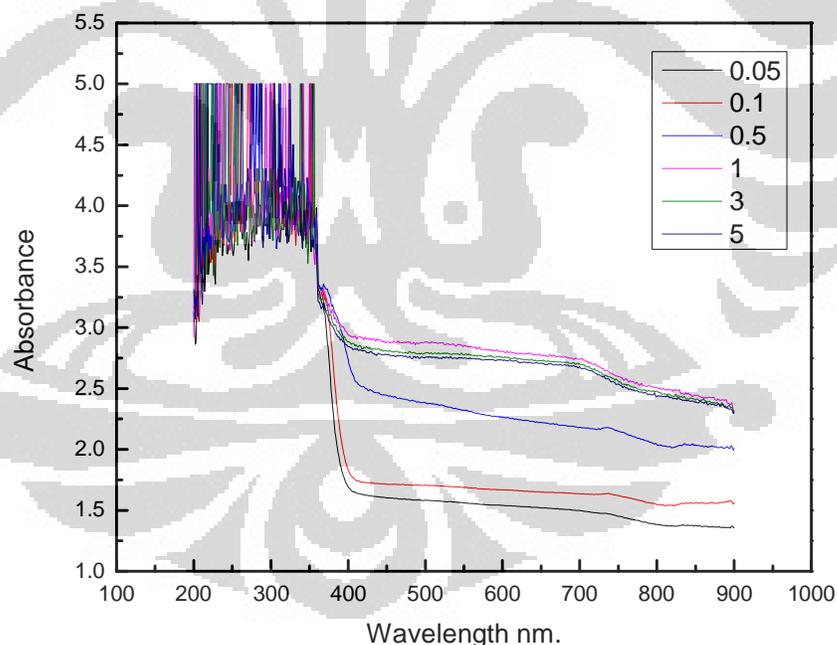
parameter kisi:  $a = 3.785 \text{ \AA}$  dan  $c = 9.155 \text{ \AA}$ . Nanopartikel  $\text{TiO}_2$  ini memiliki nilai band gap 3.19 eV dan dari nilai  $g$  nya diketahui elektron tidak berpasangan pada nanopartikel  $\text{TiO}_2$  pada nilai  $g$  sekitar 2 menunjukkan oksigen dan di bawah 2 menunjukkan menunjukkan Ti. Tujuan dari karakterisasi tersebut adalah untuk mengetahui sifat-sifat dari nanopartikel yang akan digunakan sebagai bahan nanofluida. Hasil penelitian Jacopo Buongiorno [48] yang melakukan kerja sama dengan 38 organisasi (universitas dan lembaga riset) untuk melihat pengukuran konduktivitas panas pada penelitian nanofluida yang masih dianggap belum konsisten. Hasil yang diperoleh menyebutkan hal-hal yang menyebabkan ketidakkonsistensian tersebut adalah metode pengukuran konduktivitas panas yang masih beragam, karakterisasi nanopartikel dan nanofluida yang tidak lengkap, dan metode pembuatan nanofluida yang berbeda-beda. Penelitian kali ini mencoba melakukan pengukuran selengkap mungkin untuk mempelajari karakteristik nanofluida  $\text{TiO}_2$ -akuades.

Karakterisasi nanofluida yang pertama yaitu sifat optis nanofluida  $\text{TiO}_2$  dengan menggunakan UV-Vis *spectrophotometer* Shimadzu UV-2450. Pengukuran ini dilakukan dengan melihat absorbansi dari nanofluida yang ditembak dengan sinar pada panjang gelombang 200-800nm. UV-Vis digunakan untuk melihat kestabilan nanofluida dengan variasi konsentrasi dan memastikan komposisi dalam nanofluida. Gambar 7. menunjukkan spektrum UV-Vis dari nanofluida  $\text{TiO}_2$  di sini terlihat absorbansi dari nanofluida bertambah dengan meningkatnya konsentrasi, Semakin tinggi konsentrasi menyebabkan semakin banyak pula partikel-partikel di dalam nanofluida yang akan menyerap gelombang cahaya yang ditembakkan. Hal ini juga sesuai dengan hukum Lambert Beer yang menunjukkan absorbansi berhubungan linear dengan konsentrasi  $A = \epsilon lc$ ,  $A$  adalah absorbansi dari sample.  $\epsilon$  adalah molar penyerapan,  $l$  adalah lebar sample yang dilewati cahaya,  $c$  adalah molar dari sampel. Hukum Lambert Beer berlaku untuk konsentrasi 0.05% vol-1% vol namun pada konsentrasi 3% vol dan 5% vol terjadi penurunan absorbansi di mana 3% vol di bawah 1% vol dan 5% vol di bawah 3% vol. Daerah linear pada kurva didapat pada sekitar

**Universitas Indonesia**

panjang gelombang 360 nm dengan puncak absorbansi antara 280 nm sampai 350 nm untuk semua konsentrasi. Panjang gelombang di bawah 350nm spektum sulit untuk diamati. Metode UV-Vis untuk nanofluida tidak terlalu efektif untuk konsentrasi tinggi disebabkan kepekatan dan warna fluida yang menyebabkan pengukuran tidak akurat dan sulit untuk diukur.

Ada beberapa peneliti yang menggunakan pengukuran UV-Vis untuk karakterisasi nanofluida seperti Chang et al [56]. melakukan pengukuran spektrum UV-Vis TiO<sub>2</sub> nanofluida dan didapat posisi puncaknya ada pada 280-400 nm. Raykar dan Singh [57] yang menggunakan UV-Vis untuk melihat pengaruh konsentrasi dan pengaruh surfaktan *acetylacetone* pada ZnO-akuades. Spektrum yang didapat menunjukkan peningkatan absorbansi pada penambahan konsentrasi dan daerah kurva linear juga terlihat pada konsentrasi 0.075% wt dan 0.25% wt. Pada konsentrasi 0.5% wt tidak terlihat namun absorbansinya tetap bertambah. Saleh et al [6]



**Gambar 7. Spektrum UV-Vis Nanofluida TiO<sub>2</sub>-akuades dengan variasi konsentrasi**

Universitas Indonesia

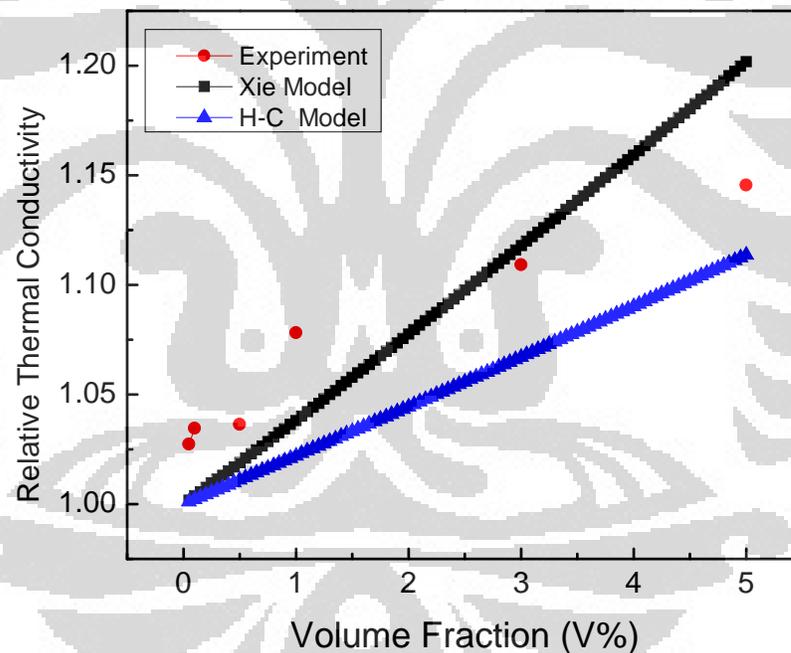
melakukan pengukuran untuk melihat nanofluida ZnO-*ethylene glycol* dengan variasi konsentrasi (0.025-0.5% vol) dan variasi ukuran rata-rata kristal yaitu 18 nm dan 23 nm dan puncaknya pada 348 nm dan 359 nm. Berdasarkan teori Mie yang dijelaskan pada *review* yang ditulis oleh Ghadimi [58], penyerapan dari permukaan *plasmon* dan *bandwidth plasmon* dipengaruhi oleh ukuran dari partikel-partikel logam di dalam larutan. Hal ini menyebabkan nilai puncak menunjukkan nanopartikel dengan ukuran yang merupakan jumlah terbanyak dalam nanofluida. Dari hasil percobaan yang pernah dilakukan Link et al [59]. dan Kreibig et al. [60] untuk nanopartikel dengan ukuran rata-rata lebih kecil dari 20 nm *bandwidth* akan berkurang sedangkan untuk ukuran rata-rata nanopartikel lebih besar dari 20 nm *bandwidth* dari permukaan plasmon akan bertambah. Hal serupa juga diperoleh Tsai et al. [42] untuk nanofluida emas-akuades yang divariasikan ukuran nanopartikelnya, ketika ukuran partikelnya meningkat, puncak pada spektrum UV-Visnya bergeser ke panjang gelombang lebih panjang. Pada hasil spektrum UV-Vis nanofluida TiO<sub>2</sub>-akuades sangat disayangkan posisi puncaknya tidak bisa teramati secara spesifik. Baby dan Ramaprabhu [61] menggunakan UV-Vis untuk melihat dispersi pada nanofluida menggunakan *graphene* (TEG) yang biasa dan *graphene* yang telah dibuat dapat larut di dalam akuades dengan ditambahkan asam (f-TEG). Hasil pengukuran UV-Vis menunjukkan absorbansi dari TEG lebih rendah dibandingkan f-TEG. Hal tersebut disebabkan nanofluida TEG tidak terdispersi dengan baik. Oleh karena itu apabila dilihat dari turunnya nilai absorbansi untuk konsentrasi 3% vol dan 5% vol, bisa diasumsikan bahwa nanofluida tersebut tidak stabil pada konsentrasi tinggi karena tidak terdispersi dengan baik.

Pada konsentrasi tinggi nanofluida tidak terdispersi dengan baik, salah satu yang menjadi penyebab nanofluida tidak terdispersi dengan baik adalah pada konsentrasi yang terlalu tinggi lebih mudah terjadi agregasi. Gharagozloo et al. [62] mencoba menjelaskan pengaruh konsentrasi dan temperatur pada fenomena agregasi nanofluida. Agregasi terbentuk lebih cepat dan lebih banyak pada konsentrasi dan temperatur lebih tinggi. Pada temperatur lebih tinggi, nanopartikel mengalami

*brownian motion* yang lebih kuat sehingga partikel-partikel akan berinteraksi lebih kuat sedangkan pada konsentrasi lebih tinggi partikel-partikel akan lebih mudah berinteraksi satu sama lain mengakibatkan agregasi. Untuk pengaruh temperatur ini juga sudah terjadi pada saat sonifikasi karena pada saat sonifikasi terjadi peningkatan temperatur yang bisa mengakibatkan terjadinya agregasi padahal tujuan dari sonifikasi adalah untuk memecah gumpalan-gumpalan nanopartikel. Pengaruh temperatur dan konsentrasi pada saat sonifikasi dibahas oleh Tajik et al. [63] yang mengukur kecepatan rambat pada saat *ultrasonic* untuk melihat kualitas dan kestabilan saat sonifikasi. Nanofluida yang digunakan adalah  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -akuades dan  $\text{TiO}_2$ -akuades, hasil yang diperoleh menunjukkan bertambahnya konsentrasi dan meningkatnya temperatur mengakibatkan kecepatan rambat ultrasonik berkurang. Hal ini bisa menunjukkan bahwa selain konsentrasi, proses sonifikasi juga bisa menjadi faktor yang mempengaruhi ketidakstabilan nanofluida. Permasalahan pada sonifikasi ini juga diteliti oleh Ruan dan Jacobi [29] menggunakan *Multi Wall Carbon Nanotube* dicampurkan ke dalam *ethylene glyco*. Mereka mersonifikasi hingga 1335 menit. Lalu setiap selang beberapa waktu mereka mencoba melihat dispersi yang terjadi dengan SEM dan TEM yang hasilnya menunjukkan pada waktu 520 menit sudah terjadi dispersi yang baik. Oleh karena itu peneliti menganalisis bahwa agregasi yang terjadi pada 5% vol lebih banyak dibandingkan 3% vol dan 1% vol.

Karakterisasi selanjutnya dari nanofluida adalah konduktivitas panas. Pengukuran konduktivitas panas menggunakan KD2 Decagon. Hasil pengukuran konduktivitas panas ditunjukkan oleh Gambar 8. di mana konduktivitas panas meningkat dengan meningkatnya konsentrasi. Pada konsentrasi-konsentrasi kecil peningkatan konduktivitas panasnya tidak terlalu signifikan namun pada konsentrasi 1% vol, 3% vol, 5% vol konduktivitas panas meningkat hingga 7.8%, 10.9%, 14.5% dibandingkan fluida dasarnya. Para peneliti lain pun melakukan pengukuran konduktivitas panas nanofluida  $\text{TiO}_2$ , antara lain: Hong et al. [15] membuat nanofluida  $\text{TiO}_2$ -*ethylene glycol* dan memperoleh kenaikan konduktivitas panas 14% pada konsentrasi 1% vol. Fedele et al [16] memperoleh kenaikan 9.9% pada

konsentrasi 5.54% vol dari nanofluida  $\text{TiO}_2$ -akuades. Putra et al. [5] juga mengukur konduktivitas panas untuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dan  $\text{TiO}_2$  dengan menggunakan dua jenis fluida dasar yaitu akuades dan *ethylene glycol*. Untuk nanofluida  $\text{TiO}_2$ nya peningkatan konduktivitas yang diperoleh pada konsentrasi 5% vol adalah 13% untuk akuades dan 8% untuk *ethylene glycol*. He et al. [17] juga melakukan pengukuran konduktivitas panas pada  $\text{TiO}_2$  akuades dan memperoleh peningkatan 8.6% pada konsentrasi 2% vol dan Murshed et al. [18] memperoleh peningkatan 30% pada konsentrasi 5% vol. Wang et al [19] dan Pak dan Cho [20] memperoleh peningkatan 11% dan 12% pada konsentrasi 4% vol. Zhang et al. [21] dan Turgut et al. [22] memperoleh kenaikan 6.5% dan 6.9% pada konsentrasi 3% vol.



**Gambar 8. Konduktivitas panas nanofluida  $\text{TiO}_2$  dengan variasi konsentrasi**

Nilai peningkatan konduktivitas panas nanofluida  $\text{TiO}_2$  apabila dibandingkan dengan hasil peneliti lain menunjukkan peningkatan konduktivitas yang berbeda-beda meskipun menggunakan metode pembuatan yang sama, metode dua langkah. Hasil

**Universitas Indonesia**

penelitian Murshed menunjukkan peningkatan konduktivitas panas tertinggi hingga 30%, dua kali lipat dari peningkatan yang didapat dari hasil eksperimen. Nilai yang berbeda-beda ini masih menjadi anomali dikarenakan belum ada metode yang benar-benar sama untuk setiap penelitian nanofluida. Hal ini disebabkan beberapa karakter yang berbeda pada nanofluida yang biasanya dijadikan variasi pada penelitian nanofluida. John dan Shima [23] pada *review*-nya membahas faktor-faktor yang mempengaruhi nilai konduktivitas panas antara lain: fluida dasar, nanopartikel yang digunakan, konsentrasi nanofluida, ukuran nanopartikel, temperatur, bentuk nanopartikel atau rasio permukaan, penambahan surfaktan, pengaruh pH, teknik serta lamanya sonifikasi, dan agregasi.

Selain melalui eksperimen para peneliti mencoba mencari nilai konduktivitas dengan cara permodelan. Model paling pertama adalah model Maxwell [31]. Dasar dari model Maxwell adalah menghitung suspensi dari *spherical* partikel tanpa memperhatikan interaksi antarpartikel tersebut karena dianggap partikel terdispersi sempurna. Model Maxwell mengasumsikan semua bentuk partikel adalah *spherical*. Model Maxwell menunjukkan bahwa dengan meningkatnya konsentrasi maka jumlah suspensi akan semakin banyak dan meningkatkan konduktivitas panas. Model ini kemudian dikembangkan oleh Hamilton-Crosser [32] untuk bentuk partikel yang bukan *spherical*.

$$k_e = k_m + 3V_p \frac{k_p - k_m}{2k_m + k_p} k_m \quad \text{Model Maxwell}$$

$$k_e = \left[ \frac{k_p + (n-1)k_m - (n-1)V_p(k_m - k_p)}{k_p + (n-1)k_m + V_p(k_m - k_p)} \right] k_m \quad \text{Model Hamilton-Crosser [32]}$$

$$n = 3\psi^{-1} \quad \text{Empirical Shape Factor}$$

$\psi$  adalah rasio dari area permukaan *sphere* (dengan volume *sphere* sama dengan partikel) dengan *surface area particle*,  $k_e$  adalah konduktivitas nanofluida,  $k_p$  adalah konduktivitas partikel,  $k_m$  adalah konduktivitas fluida dasar, dan  $V_p$  adalah konsentrasi (fraksi Volume)

Model Hamilton Crosser digunakan untuk pembandingan dengan hasil eksperimen kali ini namun menunjukkan nilai konduktivitas panas yang berbeda dengan hasil eksperimen. Hasil eksperimen nanofluida TiO<sub>2</sub>-akuades memiliki peningkatan konduktivitas panas lebih tinggi dan peningkatannya tidak linear. Hal ini juga dibuktikan oleh Lee et al. [64] yang membandingkan model Hamilton Crosser dengan hasil eksperimennya. Lee membuat nanofluida dengan metode dua langkah menggunakan nanopartikel CuO (23.6nm) dan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(38.4 nm) dengan fluida dasar akuades dan *ethylene glycol*. Metode pengukuran konduktivitas panas yang digunakan adalah *Transient Hot Wire*. Hasil yang diperoleh menunjukkan metode Hamilton-Crosser sesuai untuk nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> baik pada fluida dasar akuades maupun *ethylene glycol*. Akan tetapi, pada nanofluida CuO metode Hamilton-Crosser gagal menjelaskan nilai konduktivitas panas yang diperoleh. Lee menganalisis bahwa penyebabnya adalah ukuran dari partikel CuO yang lebih kecil bila dibandingkan dengan ukuran partikel Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Eastman et al. [65] menambahkan bahwa perbedaan ukuran partikel akan mempengaruhi rasio permukaan partikel dengan volumenya. Hal tersebut tidak dibahas pada model Hamilton Crosser.

Model Hamilton Crosser kemudian dikembangkan oleh banyak peneliti, salah satunya Xie [33]. Model Xie ini menghitung peningkatan konduktivitas panas nanofluida dengan memperhitungkan efek ketebalan *nanolayer*, ukuran nanopartikel, fraksi volume, dan rasio konduktivitas panas antara partikel dan fluida.

$$k_{eff}/k_f = \left(1 + 3\Theta\phi_T + \frac{3\Theta^2\phi_T^2}{1-\Theta\phi_T}\right) \quad \text{Model Xie [33]}$$

$$\text{Dengan } \Theta = \frac{\beta_{lf} \left[ (1+\gamma)^3 - \beta_{pl}/\beta_{fl} \right]}{(1+\gamma)^3 + \beta_{lf}/\beta_{pl}}$$

$$\beta_{lf} = \frac{kl-kf}{kl+2kf} \beta_{pl} = \frac{kp-kl}{kp+2kl} \beta_{fl} = \frac{kf-kl}{kf+2kl}$$

$k_l$  adalah konduktivitas dari *nanolayer*,  $k_f$  adalah konduktivitas fluida,  $k_p$  adalah konduktivitas nanopartikel.  $\gamma = \delta/r_p$  adalah rasio dari ketebalan *nanolayer* dibandingkan dengan radius nanopartikel.  $\phi_T = \phi(1+\gamma)^3$  adalah modifikasi total fraksi volume dari *nanolayer* dan nanopartikel. Model Xie juga digunakan sebagai pembanding dengan hasil eksperimen pada Gambar 8. memberikan prediksi yang lebih baik dibandingkan model Hamilton Crosser karena memperhatikan banyak hal seperti ukuran nanopartikel dan ketebalan *nanolayer* yang tidak ada pada model Hamilton Crosser. Akan tetapi pada eksperimen kali ini, konduktivitas panas dengan model Xie tidak menunjukkan hasil yang sama dengan eksperimen meskipun lebih mendekati dibandingkan model Hamilton Crosser. Turgut et al. [22] juga mencoba menggunakan model Xie sebagai pembanding dengan hasil eksperimennya untuk nanofluida TiO<sub>2</sub>-akuades dan hasilnya juga tidak sesuai.

Model Hamilton Crosser dan model Xie dapat dikategorikan sebagai model klasik karena hanya melihat konduktivitas panas sebagai pengaruh dari suspensi tanpa melihat interaksi-interaksi yang terjadi. Meski demikian model-model yang dikategorikan modern karena melihat interaksi-interaksi antar partikel-pun belum ada yang dapat menjelaskan penyebab kenaikan konduktivitas panas. Keblinski et al. [66] mengusulkan empat buah metode hasil permodelan para peneliti lain yang cukup potensial untuk membahas peningkatan konduktivitas panas yang anomali dari nanofluida. Keempat metode tersebut antara lain *Brownian motion of nanoparticles*, *ballistic phonon transport inside nanoparticles*, *interface layering of liquid molecules*, dan *nanoparticle clustering*. Ada juga Seok dan Choi [67] membuat sebuah model dengan memperhatikan empat cara dari perpindahan energi. Model tersebut dibagi menjadi empat tahapan, antara lain:

1. *Base Fluid Molecules*

Tumbukan antara molekul-molekul fluida dasarnya. Dengan kata lain tahap ini memperhatikan konduktivitas panas dari fluida dasarnya.

2. *Nanoparticles*

Memperhatikan difusi panas dari nanopartikel-nanopartikel dengan fluida. Cara ini bisa dianggap memperhatikan konduktivitas panas dari nanopartikelnya.

### 3. *Collision of Nanoparticles with each other*

Tumbukan antara nanopartikel yang satu dengan nanopartikel lainnya dengan cara gerak translasi akibat dari *brownian motion* pada  $\lambda$  yang panjang. Energi pada tahap ini bernilai sangat kecil bahkan mendekati nol sehingga bisa diabaikan.

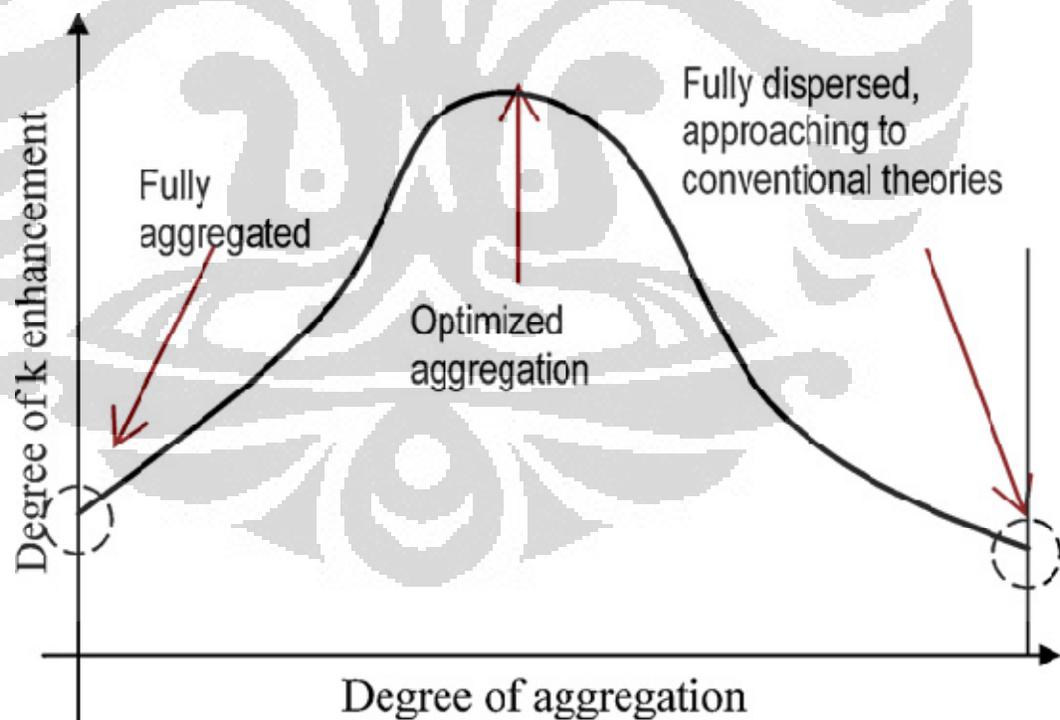
### 4. *Nanoconvection*

*Brownian motion* dari nanopartikel dengan panjang gelombang yang pendek disebabkan oleh tumbukan antara molekul-molekul fluida dasar dengan nanopartikel-nanopartikel yang terfluktuasi oleh induksi panas. Fluktuasi oleh induksi panas menyebabkan sebuah partikel dalam fluida bergerak bervariasi pada jutaan arah dalam hitungan perdetik.

Model ini dicocokkan dengan hasil eksperimen untuk nanofluida CuO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Cu, dan *carbon nanotube* hasil dari peneliti lainnya dan menunjukkan model Seok dan Choi mendekati hasil eksperimen.

Model yang cukup menarik untuk dibahas lebih lanjut adalah model di mana interaksi antar partikel menyebabkan agregasi yang nantinya menyebabkan kenaikan konduktivitas panas. Hal ini menarik karena pada hasil yang diperoleh melalui UV-Vis di mana ketidakstabilan nanofluida pada konsentrasi 3% vol dan 5% vol, konduktivitas panasnya tetap lebih tinggi dibandingkan nanofluida lainnya yang stabil. Pengaruh agregasi ini dibahas oleh banyak peneliti seperti Gharagozloo et al. [62] yang mencoba menjelaskan pengaruh konsentrasi dan temperatur pada fenomena agregasi nanofluida di mana konsentrasi dan temperatur adalah variabel yang mempengaruhi nilai konduktivitas panas. Agregasi terbentuk lebih cepat dan lebih banyak pada konsentrasi dan temperatur lebih tinggi. Pada temperatur lebih tinggi nanopartikel akan mengalami *brownian motion* yang lebih kuat sehingga partikel-partikel akan berinteraksi lebih kuat dan mengakibatkan agregasi. Sedangkan pada konsentrasi lebih tinggi partikel-partikel akan lebih mudah berinteraksi satu sama lain mengakibatkan agregasi. Percobaan ini dibuktikan dengan *static light scattering* dan

SEM untuk melihat agregasi yang terjadi. Feng et al. [68] membuat model dengan menghitung ketebalan nanolayer dan ukuran partikel yang sudah berubah akibat agregasi. Model Feng bisa dikatakan modifikasi dari model Xie ditambah akibat agregasi sehingga ketebalan nanolayer dan ukuran partikel bertambah. Prasher [30] et al. menyatakan permodelan konduktivitas panas *brownian motion* dan metode dengan agregasi adalah dua metode yang bekerja namun tidak berhubungan langsung. Pada saat belum terjadi agregasi, *brownian motion* yang mempengaruhi konduktivitas panas. Akan tetapi ketika agregasi mulai terbentuk akibat gaya Van der Waals baik itu yang disebabkan temperatur, konsentrasi, ataupun waktu maka *brownian motion* akan berkurang pengaruhnya dan agregasilah yang paling berpengaruh terhadap konduktivitas panas. Namun ketika agregasi sudah terlalu banyak, maka akan terjadi sedimentasi di mana partikel-partikel yang ter-agregasi menjadi lebih berat dibandingkan sebelumnya dan mengendap ke bawah. Maka dari itu, ada saat di mana konduktivitas maksimum akibat agregasi seperti pada Gambar 9.



**Gambar 9. Pengaruh agregasi terhadap konduktivitas sebagai fungsi waktu [67]**

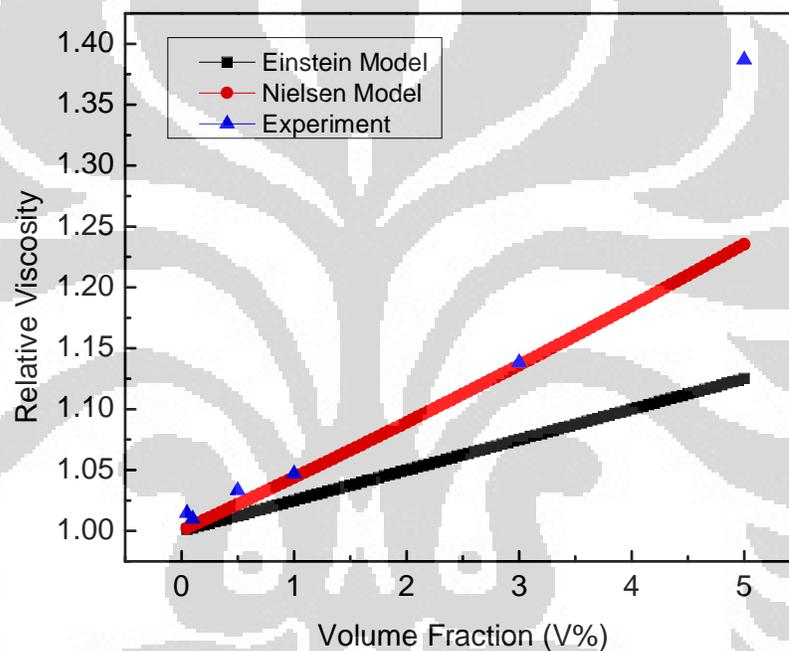
Universitas Indonesia

Gharagozloo dan Goodson [69] membuat model dengan metode Monte Carlo dan difusi panas yang dibandingkan dengan hasil eksperimen mereka. Tujuan digunakan metode Monte Carlo adalah agar diperoleh hasil yang berulang dan acak untuk setiap kali pengambilan data. Ada dua tipe dari simulasi Monte Carlo yang dilakukan untuk menghitung nilai konduktivitas panas pengaruh dari agregasi. Pertama adalah untuk simulasi untuk melihat pertambahan dan struktur yang terbentuk akibat agregasi dan yang kedua untuk melihat kemungkinan-kemungkinan untuk ekstraksi efek massal karena agregasi seperti difusi panas yang terjadi. Eksperimen mereka menggunakan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -akuades ditambah asam nitrid dan diperoleh bahwa model mereka sesuai konduktivitas panas, viskositas, ukuran agregasi partikel, dan membuktikan dari paper mereka yang sebelumnya [62] bahwa pengaruh temperatur dan konsentrasi mempengaruhi agregasi. Lee et al. [70] melakukan eksperimen nanofluida ZnO dengan metode satu langkah dan diperoleh pada konsentrasi tinggi pengaruh temperatur terhadap konduktivitas panas sangat besar. Pada analisisnya Lee mengatakan bahwa pada model *brownian motion* konduktivitas panas meningkat akibat pengaruh temperatur dan ukuran partikel yang lebih kecil. Sedangkan model agregasi konduktivitas panas meningkat pada temperatur dan konsentrasi yang lebih tinggi akibat agregasi. Hasil eksperimen Lee lebih mengarah pada model agregasi karena meskipun ukuran partikel lebih kecil nantinya partikel-partikel tersebut akan teragregasi dan inilah yang mempengaruhi nilai konduktivitas panasnya.

Karakterisasi nanofluida yang terakhir adalah viskositas untuk mempelajari pergerakan fluida. Pengukuran dilakukan dengan alat viskometer LV-DVE dari Brookfield Engineering Inc. dengan metode *rotational type* dengan tambahan UL-Adapter sehingga dapat dilakukan pengukuran viskositas hingga nilai minimal 1cP. Pengukuran tersebut dilakukan pada kecepatan putaran 100 RPM. Sampel yang akan diukur dimasukkan ke dalam *sample chamber* yang suhunya dijaga konstan pada suhu  $25^{\circ}\text{C}$ . Gambar 10. menunjukkan viskositas dengan variasi konsentrasi, viskositas meningkat dengan meningkatnya konsentrasi. Nanofluida dengan

**Universitas Indonesia**

konsentrasi 0.05-1% Vol kenaikan viskositasnya tidak terlalu besar hanya meningkat tidak lebih dari 5% dibandingkan fluida dasarnya namun pada konsentrasi 3% vol dan 5% vol viskositas meningkat hingga 14% dan 38.6%. Kenaikan viskositas ini sebanding dengan kenaikan konduktivitas panas akibat variasi konsentrasi. Namun dalam aplikasi penghantaran panas, viskositas yang terlalu tinggi terkadang tidak menguntungkan.



**Gambar 10. Viskositas nanofluida TiO<sub>2</sub>-akuades dengan variasi konsentrasi**

Peneliti lain yang melakukan pengukuran viskositas adalah Duangthongsuk [71] melakukan pengukuran viskositas pada nanofluida TiO<sub>2</sub>-akuades dengan variasi konsentrasi dan temperatur. Pada temperatur 25<sup>0</sup>C dan konsentrasi 1% vol viskositas meningkat hingga 8% dibandingkan fluida dasarnya, pola yang diperoleh menunjukkan viskositas meningkat seiring bertambahnya konsentrasi dan viskositas menurun pada temperatur yang lebih tinggi. Fedele et al. [16] juga melakukan pengukuran viskositas untuk nanofluida TiO<sub>2</sub>-akuades yang dibuat dengan

**Universitas Indonesia**

mengencerkan nanofluida komersil dan didapat kenaikan viskositas sebesar 9.9% pada konsentrasi 5% vol, eksperimen ini juga melakukan variasi temperatur dan konsentrasi yang menunjukkan pola yang sama dengan hasil penelitian Duangthongsuk [71]. Anoop et al. [72] melakukan pengukuran pada viskositas dan aliran (*flow*) pada nanofluida. Nanofluida yang digunakan terbagi pada dua kategori. Kategori yang pertama menggunakan metode dua langkah untuk  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -akuades dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -*ethylene glycol*. Kategori kedua dibuat dengan mengencerkan nanofluida  $\text{CuO}$ -*ethylene glycol* dan  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -akuades yang sudah jadi. Hasil yang diperoleh menunjukkan viskositas meningkat dengan peningkatan konsentrasi, sedangkan viskositas menurun akibat peningkatan temperatur. Penurunan viskositas akibat pengaruh temperatur berbeda-beda nilainya bergantung pada sifat fluida dasarnya. Sedangkan aliran nanofluida yang diteliti menunjukkan nanofluida memiliki karakter yang sama dengan fluida yang homogen dalam aliran sehingga nanofluida bisa dihitung nilai alirannya apabila viskositas, densitas, dan *pressure drop*-nya diketahui.

Model-model untuk mencari nilai viskositas juga banyak diteliti oleh orang. Salah satu model yang sering dijadikan acuan adalah model Einstein  $\mu_{eff} = \mu_l(1 + 2.5\phi)$   $\mu_{eff}$  adalah viskositas nanofluida,  $\mu_l$  adalah viskositas fluida dan  $\phi$  adalah fraksi volume dari nanopartikel. Model Einstein mengkorelasikan viskositas dengan jumlah partikel yang bercampur dengan fluida tanpa melihat interaksi antar partikelnya. Dan model yang satu lagi digunakan adalah model Nielsen [40]  $\mu_{eff} = \mu_l(1 + 1.5\phi)^{\phi/(1-\phi m)}$  dengan  $\phi m$  adalah *maximum packing fraction*, di mana untuk partikel bola nilainya = 0.64 Model Nielsen ditujukan untuk partikel-partikel berkonsentrasi rendah. Kedua model ini digunakan sebagai pembandingan dengan hasil penelitian dan didapatkan bahwa nilai viskositas dari model Einstein berbeda jauh dengan hasil eksperimen, sedangkan model Nielsen cukup mendekati hingga konsentrasi 3% vol namun jauh berbeda dengan konsentrasi 5% vol.

Surganthi dan Rajan [73] melakukan pengukuran viskositas untuk  $\text{ZnO}$ -akuades dengan variasi konsentrasi dan temperatur. Pada konsentrasi 2% vol terlihat bahwa ukuran rata-rata agregasi yang terjadi lebih besar apabila dibandingkan

**Universitas Indonesia**

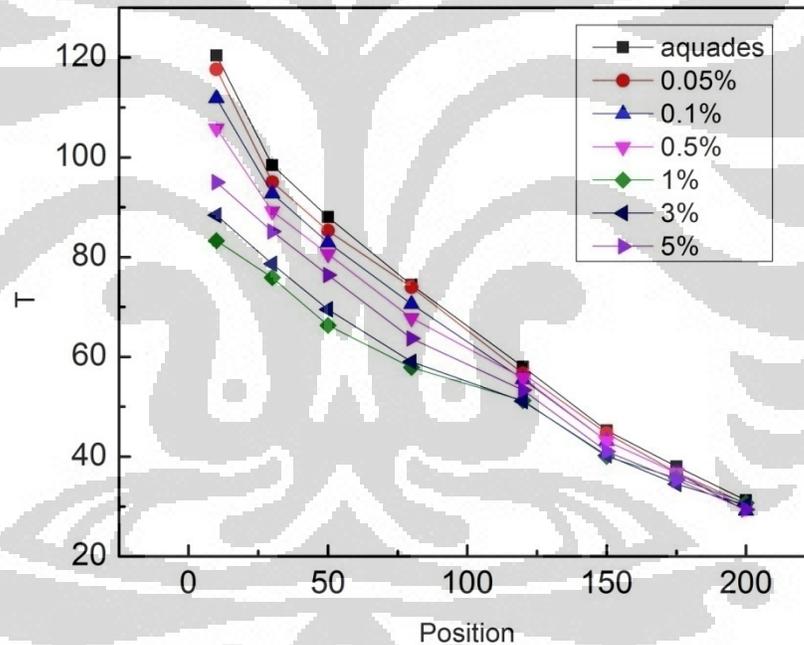
konsentrasi lainnya ini disebabkan pada konsentrasi tinggi lebih mudah terjadi agregasi. Oleh karena itu dilakukan variasi tambahan pada konsentrasi 2% vol yaitu perbedaan waktu sonifikasi 3 jam dan 6 jam. Ternyata dari perbedaan waktu sonifikasi itu didapatkan perbedaan ukuran agregasi 171 nm dan 188 nm. Hasil pengukuran viskositasnya menunjukkan nanofluida dengan agregasi 188 nm memiliki viskositas hingga 28% lebih tinggi dibandingkan dengan agregasi 171 nm. Hasil penelitian Surnanthi dan Rajan memberikan penjelasan kenapa pada konsentrasi 5% vol nilai viskositas yang diperoleh jauh berbeda dengan model Nielsen yaitu karena pengaruh agregasi. Hal tersebut sesuai dengan hasil UV-Vis di mana viskositas tetap meningkat meskipun konsentrasi 3% vol dan 5% vol lebih rendah absorbansinya daripada 1% vol. Zhao et al. [39] melakukan pengukuran nanofluida dengan variasi ukuran partikel dan pH. Pada ukuran nanopartikel yang kecil viskositas menjadi lebih bergantung pada fraksi volumenya. Untuk pengaruh pH pada viskositas, terlihat untuk diameter partikel yang besar, pH tidak memberikan pengaruh yang signifikan. Sedangkan untuk diameter partikel yang kecil, pH berpengaruh khususnya pada pH 5-7. Pengaruh pH dikatakan mempengaruhi terhadap surface atau agregasi. Hal ini dibuktikan dengan membandingkan rasio  $d_a/d$  (*aggregate/particle size*) yang berubah.

Setelah pengukuran UV-Vis, konduktivitas panas dan viskositas selesai dilakukan, nanofluida dimasukkan ke dalam *heat pipe* untuk mempelajari pengaruh nanofluida dengan variasi konsentrasi sebagai fluida kerja di dalam *heat pipe*. *Heat pipe* tembaga lurus dengan panjang 200 mm dan diameter dalamnya 6 mm. Untuk bagian dalam pipa digunakan *sintered wick* yang dibuat dari serbuk tembaga dengan kemurnian 99% dan berukuran 300 $\mu$ m yang di-*sinter*, dan tebal *sinter wick* yang digunakan adalah 1.2 mm. Untuk percobaan ini dilakukan pengukuran temperatur pada 8 titik (tiga evaporator, dua adiabatik, tiga kondensor). Bagian evaporator: 10 mm, 30 mm, 50 mm; bagian adiabatik: 80 mm, dan 120 mm; bagian kondensor: 150 mm, 175 mm, 200 mm. Bagian evaporator dililit dengan kabel pemanas dengan variasi daya ( $Q$ ) dari DC-*power supply* yang divariasikan pada 10 Watt, 20 Watt dan

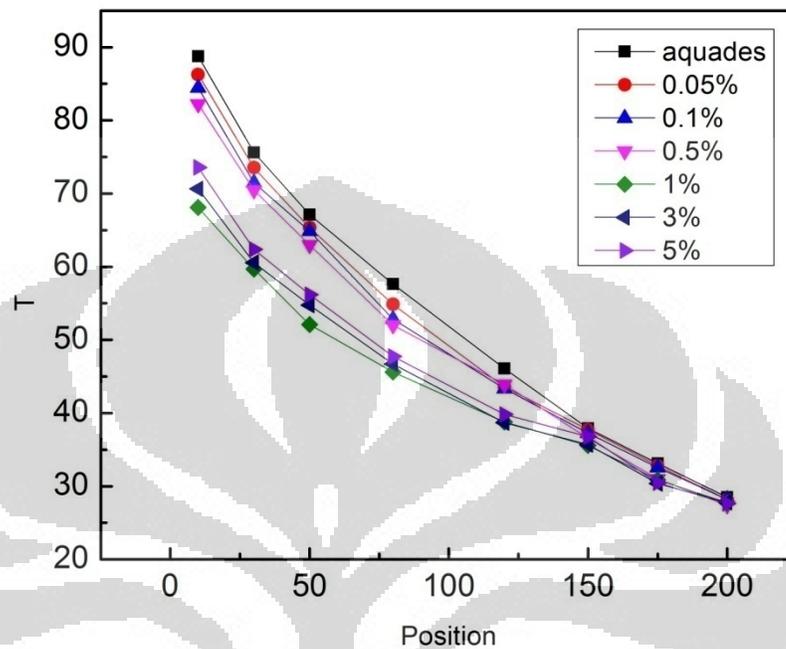
30 Watt. Sedangkan bagian kondensor terhubung dengan CTB yang dioperasikan pada suhu 25 °C. Adapun variasi tambahan yang dilakukan adalah variasi kemiringan sudut *heat pipe*: 0°, 45°, 90° dan variasi jumlah fluida kerja: 40%, 60%, 80%.

Hasil pengukuran distribusi temperatur terlihat seperti pada Gambar 11. dan Gambar 12. dengan variasi konsentrasi nanofluida. Pada Gambar 11. dan Gambar 12. meski parameternya berbeda sudut dan daya yang diberikan pada pemanas, tetap terlihat pola temperatur pada dinding-dinding *heat pipe* berkurang dengan meningkatnya konsentrasi. Namun pada konsentrasi 3% vol dan 5% vol temperatur pada dinding-dinding *heat pipe* lebih tinggi temperaturnya dibandingkan pada konsentrasi 1% padahal konduktivitas panas konsentrasi 3% vol dan 5% vol lebih tinggi. Umumnya para peneliti memperoleh penurunan temperatur dengan bertambahnya konsentrasi. Misalnya Do et al. [74] menggunakan nanofluida Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-akuades sebagai fluida dasar untuk screen mesh *wick heat pipe*. Mengukur hambatan panas pada *heat pipe* dengan rumus  $R = \frac{T_{evaporator} - T_{adiabatik}}{Q}$   $T_{evaporator}$  adalah temperatur rata-rata bagian evaporator,  $T_{adiabatik}$  adalah temperatur rata-rata bagian adiabatik, dan Q adalah daya yang diberikan. Hasilnya menunjukkan hambatan panas berkurang dengan meningkatnya konsentrasi nanofluida yang digunakan. Pada 3% vol diperoleh hambatan panas berkurang sebesar 40%. Do juga melihat bagian dalam *wick* yang telah digunakan menggunakan SEM dan ternyata ada partikel Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang melapisi *screen mesh wick*. Putra et al. [5] menggunakan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>, dan ZnO dengan fluida dasar *ethylene glycol* serta Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan TiO<sub>2</sub>-akuades pada *screen mesh wick heat pipe*. Hasil yang diperoleh menunjukkan nanofluida dengan fluida dasar akuades memiliki hambatan panas yang lebih rendah dibanding dengan nanofluida yang menggunakan *ethylene glycol*. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan TiO<sub>2</sub> memiliki hambatan panas 0.26 dan 0.54 pada 30Watt dan konsentrasi 5% vol. Setelah itu *screen mesh wick* yang sudah digunakan diambil gambarnya dengan SEM dan dianalisis komposisi secara kualitatif dan kuantitatif dengan EDX. Pada semua jenis nanofluida yang digunakan terjadi pelapisan terhadap *screen mesh wick*. Kang et al. [4] menggunakan nanofluida

Ag-akuades sebagai fluida dasar untuk *sintered wick heat pipe*. Dilakukan variasi konsentrasi dan variasi ukuran partikel 10 nm dan 35 nm. Hasil yang diperoleh menunjukkan dengan meningkatnya konsentrasi diperoleh temperatur dinding-dinding *heat pipe* yang semakin rendah. Sedangkan untuk pengaruh ukuran partikel hasil yang diperoleh tidak jauh berbeda. Saleh et al. [6] menggunakan ZnO-*ethylene glycol* nanofluid ke dalam screen mesh *wick heat pipe*. Hasilnya menunjukkan peningkatan konsentrasi menghasilkan hambatan panas yang lebih kecil dan variasi ukuran rata-rata kristal 18 nm dan 23 nm menunjukkan perubahan pada hambatan panas namun tidak terlalu signifikan.



**Gambar 11. Distribusi temperatur *heat pipe* dengan variasi konsentrasi pada sudut  $0^{\circ}$  dan jumlah fluida kerja 60% dan daya untuk *heater* 30 watt**



**Gambar 12. Distribusi temperatur *heat pipe* dengan variasi konsentrasi pada sudut  $45^\circ$  dan jumlah fluida kerja 60% dan daya untuk *heater* 20 watt**

Teng et al. [46] menunjukkan kinerja maksimum tidak harus pada konsentrasi yang lebih tinggi. Teng memperoleh kinerja *heat pipe* dengan fluida dasar  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -akuades pada konsentrasi 1%wt lebih tinggi dibandingkan pada konsentrasi 3%wt. Hasil serupa juga diperoleh dengan Liu et al. [75] yang menggunakan  $\text{CuO}$ -akuades nanofluid dan ternyata hambatan panas terkecil diperoleh bukan pada konsentrasi maksimum tetapi pada konsentrasi 1%wt. Hal ini didukung oleh pengukuran koefisien penghantaran panas dari nanofluida pada bagian evaporator dan bagian kondensor yang menunjukkan nilai terbaik pada konsentrasi 1%wt. Selain itu Liu juga melakukan variasi pada tekanan pada *heat pipe* dan menunjukkan dengan berkurangnya tekanan maka hambatan panas ikut berkurang. Hasil analisis Liu menunjukkan bahwa ada batasan maksimum pada konsentrasi untuk nanofluida sebagai penghantar panas. Hasil pengukuran kinerja *heat pipe* yang dilakukan dengan konsentrasi yang tinggi meski memiliki konduktivitas yang lebih tinggi namun perlu

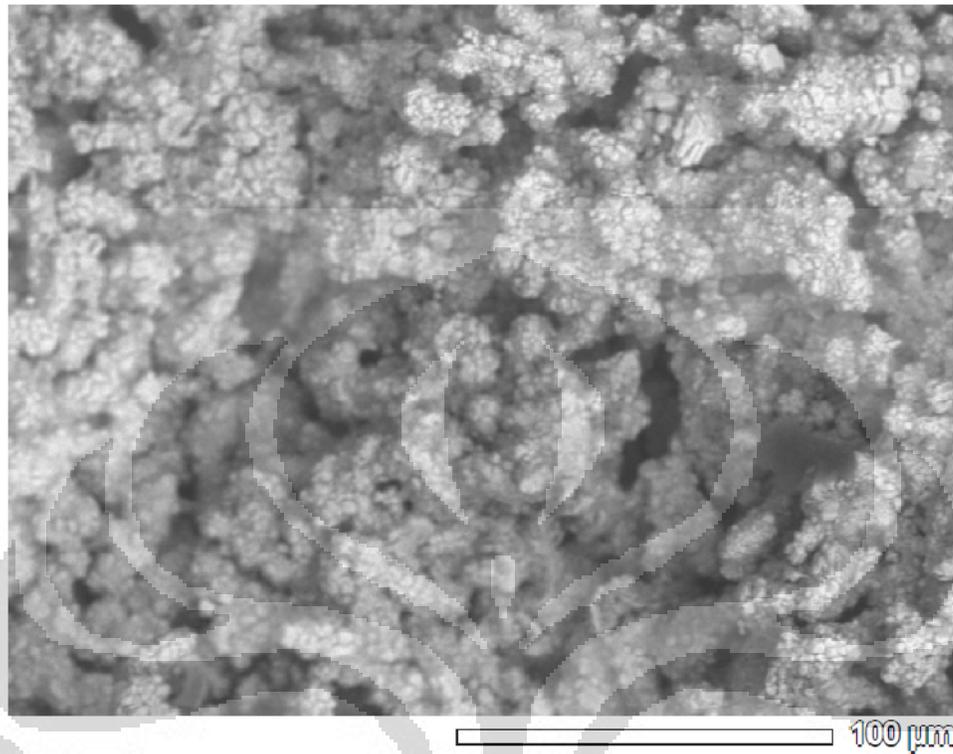
**Universitas Indonesia**

diingat konsentrasi juga mempengaruhi viskositas dan juga mempercepat agregasi. Selain Liu ada beberapa peneliti yang juga memperoleh hasil yang mengatakan ada kekurangan dalam nanofluida. Mosavian et al. [76] menyatakan bahwa koefisien penghantaran panas dari CuO-akuades lebih rendah dibandingkan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-akuades padahal hasil penelitian menunjukkan konduktivitas panas CuO-akuades lebih tinggi, dalam hal ini Mosavian menganalisis dan mengatakan bahwa ini disebabkan ukuran partikel CuO yang lebih besar dan nilai viskositas yang lebih tinggi. Selain itu Mosavian juga mengatakan bahwa ada konsentrasi maksimum dari nanofluida untuk penghantaran panas. Timofeeva et al. [38] pada penelitian sebelumnya menyatakan bahwa pada nanofluid peningkatan konduktivitas panas sangat signifikan namun hal itu juga berpengaruh pada peningkatan viskositas sehingga koefisien penghantaran panasnya lebih buruk 15% dibandingkan dengan larutan dasar. Pada penelitiannya kali ini dia memvariasikan ukuran partikelnya dan mengganti fluida dasarnya dengan campuran 50/50 akuades dan *ethylene glycol*. Hasil yang diperoleh menunjukkan peningkatan koefisien penghantaran panas hingga 14.2% dengan ukuran partikel 90nm. Cara-cara untuk meningkatkan koefisien penghantaran panas antara lain mengatur pH dan menggunakan *particle size* lebih besar dapat memperkecil viskositas. Pak dan Cho [77] melakukan pengukuran bilangan Prandtl, Reynold, dan Nusselt pada Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan TiO<sub>2</sub> nanofluida dengan fluida dasar akuades. Ukuran nanopartikel yang digunakan berturut-turut 13 nm dan 27 nm. Bilangan Nusselt dan Reynoldnya meningkat dengan peningkatan konsentrasi namun koefisien konveksinya lebih kecil 12% bila dibandingkan dengan akuades pada fraksi volume 3%.

Koefisien panas dari nanofluida tidak selamanya meningkat seiring meningkatnya konsentrasi, namun hal ini belum tentu berefek langsung pada *heat pipe* disebabkan fenomena yang terjadi dalam fluida adalah perubahan fase. Pada daerah evaporator fluida cair menjadi gas karena menyerap panas dan bergerak menuju daerah kondensor bersama nanopartikel-nanopartikel yang tidak menguap. Pada bagian kondensor gas tersebut didinginkan dan kembali menjadi fluida cair,

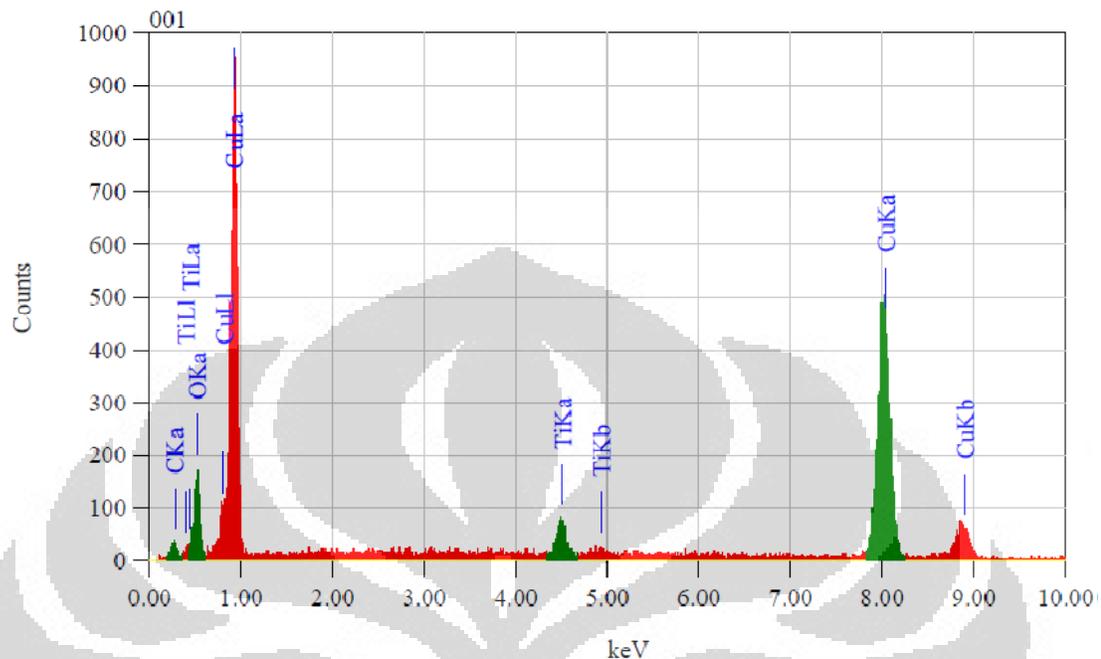
**Universitas Indonesia**

bilangan Reynold yang merupakan fungsi viskositas berpengaruh terhadap laju aliran fluida kembali ke daerah evaporator melalui pori-pori *sinter wick*. Ada satu analisis lagi yang menyebabkan temperatur *heat pipe* pada konsentrasi 3% vol dan 5% vol menjadi lebih tinggi daripada 1% vol, itu adalah agregasi. Seperti yang sudah dibahas pada analisis UV-Vis, konduktivitas panas, dan viskositas dari nanofluida, agregasi terjadi dan mempunyai pengaruh yang sangat besar. Penelitian putra [5] dan Do [74] yang melihat *wick* dengan SEM dan SEM-EDX menunjukkan terjadinya agregasi. Pada percobaan mereka tidak terjadi agregasi yang terlalu mencolok namun ketika agregasi sudah terlalu banyak, maka akan terjadi sedimentasi di mana partikel-partikel yang teragregasi menjadi lebih berat dibandingkan sebelumnya dan mengendap pada *wick*. Hal ini juga dijadikan analisis oleh Hung et al [47] yang melakukan eksperimen *heat pipe* dengan variasi konsentrasi dan memperoleh kinerja *heat pipe* yang terbaik bukanlah pada konsentrasi yang semakin tinggi. Dan dia menganggap adsorpsi adalah penyebab turunnya kinerja *heat pipe* pada konsentrasi tinggi. Untuk mengecek apakah terjadi agregasi hingga mengendap pada *wick*, dilakukan juga pengambilan gambar *wick* dengan SEM dan analisis kuantitatif-kualitatif komposisi dengan menggunakan EDX yang ditunjukkan pada Gambar 13 dan Gambar 14.



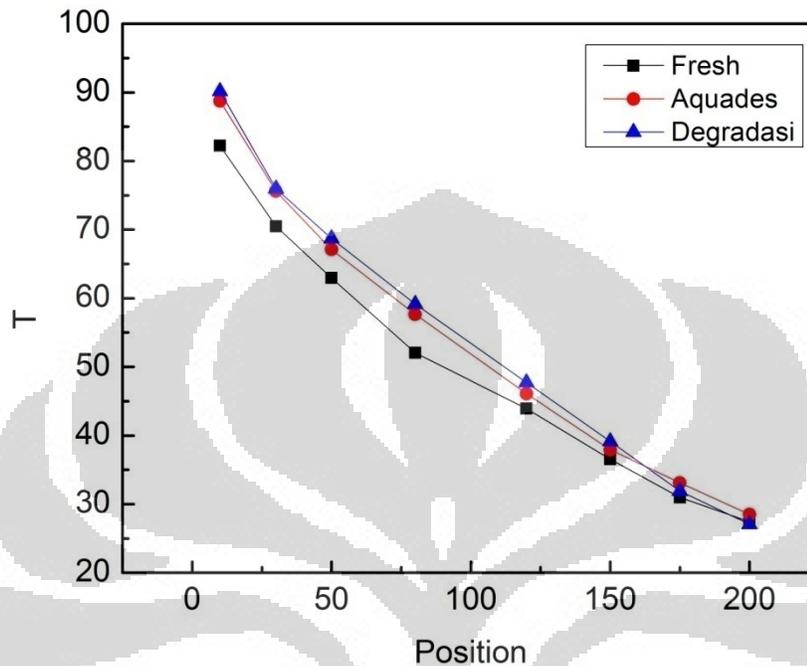
**Gambar 13. Hasil SEM *Sintered Wick Heat pipe* dengan konsentrasi nanofluida 0.5%vol**

Dari hasil SEM pada Gambar 13. terlihat hasil dari serbuk tembaga yang digunakan sebagai wick setelah di-*sinter* pada temperatur  $920^{\circ}\text{C}$  selama 2 jam. Terlihat serbuk tembaga yang saling berikatan dan membentuk padatan yang berpori-pori. Sayangnya dari Gambar 13. ini kita tak dapat melihat adanya nanopartikel  $\text{TiO}_2$  yang menempel pada wick disebabkan perbesarannya yang hanya 500 kali namun pada hasil EDX diketahui bahwa ada unsur Ti sebanyak 2.64% dari massa keseluruhan pada *wick* tersebut. Selain Ti unsur-untur yang diidentifikasi antara lain Cu (82.25% massa), O (10.41% massa) dan C (4.7% massa). Hasil ini menunjukkan nanofluida mengalami aglomerasi di dalam *heat pipe*.



**Gambar 14.** Hasil analisis kuantitatif dan kualitatif (EDX) *sintered wick heat pipe* dengan konsentrasi nanofluida 0.5%vol

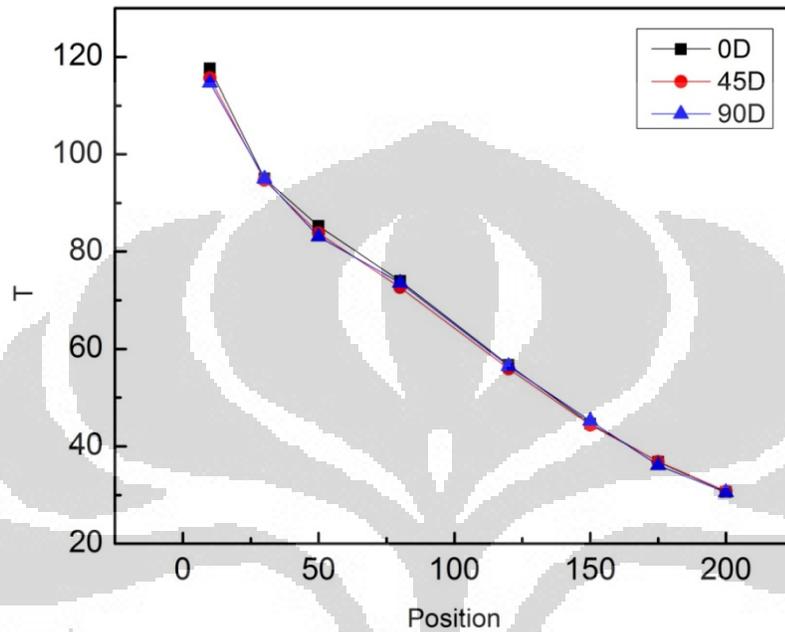
Dilakukan juga pengukuran lain untuk melihat apakah benar penurunan kinerja disebabkan agregasi. Agregasi yang akan diamati kali ini disebabkan oleh pengaruh waktu. *Heat pipe* yang sudah didiamkan selama satu bulan akan diukur kembali distribusi temperaturnya. Hasilnya ada pada Gambar 15. menunjukkan temperatur pada semua bagian dinding lebih tinggi dibandingkan dengan saat pengukuran pertama kali bahkan bila dibandingkan dengan fluida kerja akuades. Nanofluida yang sudah terdegradasi lebih buruk kinerjanya karena nanopartikelnya sudah tidak lagi terdispersi di dalam fluida sehingga fluida kerjanya hanya akuades biasa. Selain sudah terdegradasi, agregasi yang terjadi menutupi pori-pori sehingga porositas dari *heat pipe* menjadi berkurang. Berkurangnya porositas pada *heat pipe* ini menyebabkan kecepatan aliran fluida menjadi berkurang sehingga kinerja degradasi menjadi lebih buruk dibandingkan fluida dasar akuades.



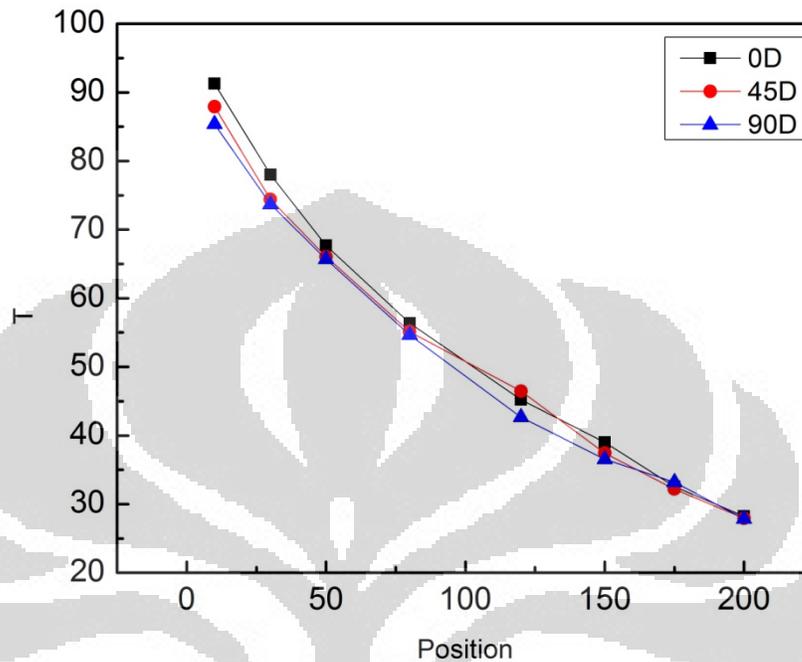
**Gambar 15. Degradasi kinerja pada *heat pipe* (konsentrasi 0.5%vol, jumlah fluida kerja 60%, sudut 45<sup>0</sup>, daya 20W)**

Pengukuran tambahan yang dilakukan adalah melihat pengaruh sudut dan pengaruh jumlah fluida kerja. Gambar 16. dan Gambar 17. menunjukkan pengaruh dari variasi sudut pada saat pengambilan data *heat pipe*. Hasil percobaan pada Gambar 16. dan Gambar 17. menunjukkan perubahan yang sangat kecil namun sudut 90<sup>0</sup> memberikan distribusi temperatur lebih rendah dibandingkan 45<sup>0</sup> dan 0<sup>0</sup> Hal ini disebabkan oleh adanya kontribusi dari gravitasi pada aliran fluida yang terkondensasi ketika melewati *wick* dari *heat pipe*. Hal berbeda diperoleh Narphon et al. [43] yang memperoleh kinerja *heat pipe* yang optimum pada sudut 45<sup>0</sup> dengan fluida kerja akuades tetapi pada fluida dasar alkohol kinerja yang optimum diperoleh pada sudut 60<sup>0</sup>. Teng et al. [46] melakukan variasi sudut pada pengukuran kinerja *heat pipe* dengan fluida dasar Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-akuades. Pada semua konsentrasi yang digunakan diperoleh hasil yang terbaik pada sudut 60<sup>0</sup> dibandingkan 30<sup>0</sup> dan 90<sup>0</sup>. Hung et al.

[47] juga melakukan variasi sudut pada saat



**Gambar 16. Distribusi temperatur *heat pipe* dengan variasi sudut pada konsentrasi 5% , jumlah fluida kerja 60% dan daya untuk *heater* 30watt**

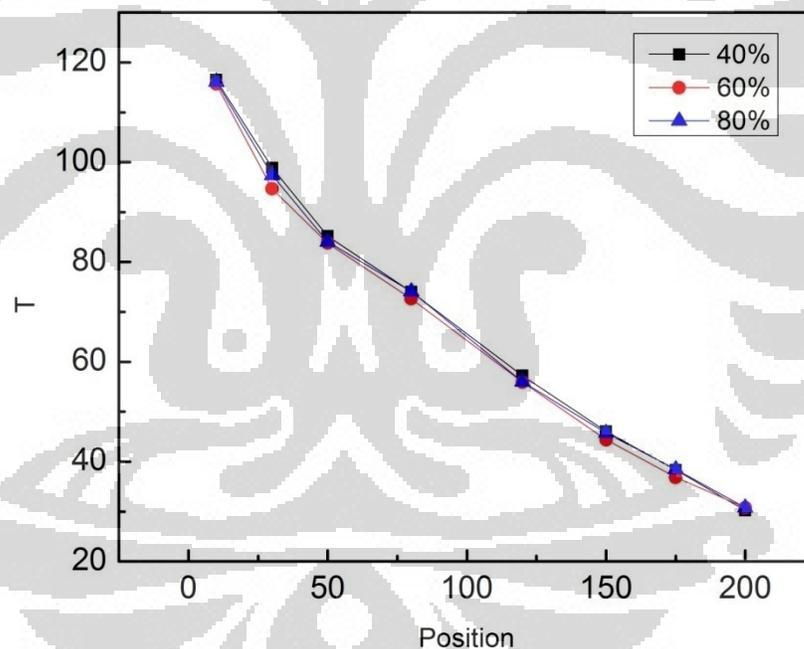


**Gambar 17. Distribusi temperatur *heat pipe* dengan variasi sudut pada konsentrasi 0.05% , jumlah fluida kerja 80% dan daya untuk *heater* 20watt**

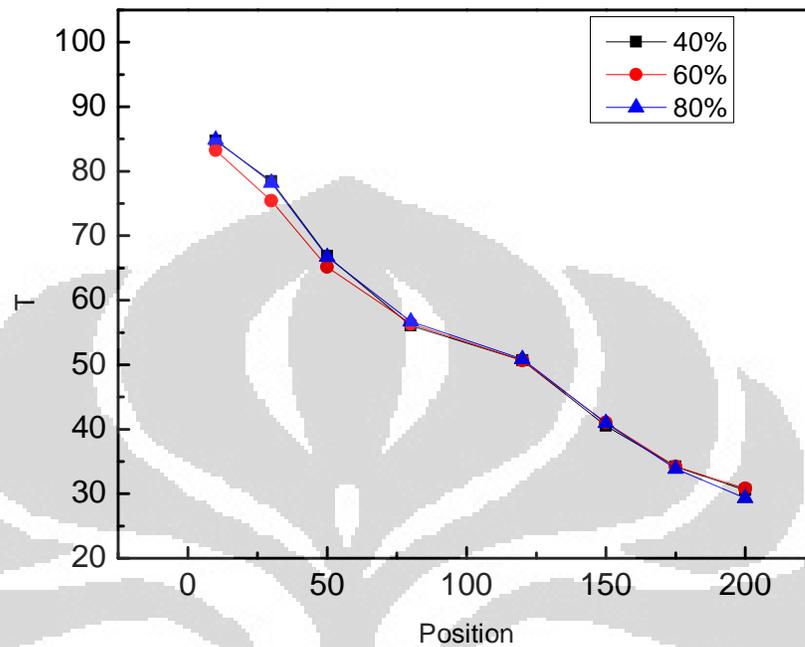
pengambilan data *heat pipe* dan dia memperoleh hasil bahwa pengaruh sudut tidak memiliki pola pada sudut  $40^{\circ}$ ,  $70^{\circ}$ , dan  $90^{\circ}$ . Namun ketiga sudut itu memiliki hasil yang lebih baik dibandingkan  $10^{\circ}$ . Dapat disimpulkan dari hasil eksperimen dan penelitian yang lain, pengaruh sudut pada *heat pipe* bisa dibilang tidak terlalu signifikan untuk sudut di atas  $10^{\circ}$ . Pengaruh gravitasi tidak dipungkiri memberikan pengaruh pada kinerja *heat pipe* namun perlu diingat viskositas, jumlah fluida kerja, dan pori-pori pada *wick* juga memiliki pengaruh pada aliran fluida di dalam *heat pipe*.

Selanjutnya performa *heat pipe* pada variasi jumlah fluida kerja. Berikut pada Gambar 18 dan Gambar 19 menunjukkan distribusi temperatur dinding *heat pipe* pada persentase berbeda dari fluida kerja. Hasil yang diperoleh menunjukkan jumlah fluida kerja yang optimum adalah pada 60% dari volume total *heat pipe*. Sedangkan presentase 40% dan 80% tidak terlalu berbeda jauh dengan 60% namun menghasilkan

distribusi temperatur yang lebih tinggi. Hal serupa juga diperoleh Naphon et al. [43] yang kinerja *heat pipe* terbaiknya pada jumlah fluida kerja 66%. Menurut Naphon penyerapan dari panas yang diberikan oleh evaporator bergantung pada banyaknya fluida kerja yang ada dalam *heat pipe*. Semakin banyak fluida kerja yang digunakan, semakin besar penyerapan panas yang terjadi di evaporator, sehingga semakin cepat proses *transfer* panas terjadi. Akan tetapi pada jumlah fluida kerja yang lebih tinggi, kinerja *heat pipe* turun dan pada analisisnya Naphon mengatakan meskipun lebih banyak panas dari evaporator yang diserap, namun ruang yang ada di dalam *heat pipe* untuk uap-uap yang yang kembali ke fase cair dari bagian kondensor menjadi lebih kecil. Akibatnya proses penyerapan panas yang terjadi menjadi lebih lambat.



**Gambar 18. Distribusi temperatur *heat pipe* dengan variasi jumlah fluida kerja pada konsentrasi 0.05% , sudut  $45^{\circ}$  dan daya untuk heater 30watt**



**Gambar 19. Distribusi temperatur *heat pipe* dengan variasi jumlah fluida kerja pada konsentrasi 1% , sudut  $45^0$  dan daya untuk *heater* 30watt**

Hasil penelitian Hung et al. [47] dan Teng et al. [46] menunjukkan presentase fluida kerja untuk kinerja *heat pipe* yang optimum berbeda-beda bergantung sudut dan jenis fluida kerja yang digunakan, dan *heat pipe* yang digunakan. Maka dari hasil percobaan variasi sudut dan jumlah fluida kerja pada eksperimen kali ini, diperoleh pengaruh sudut tidak signifikan sedangkan jumlah fluida kerja sebesar 60% yang menghasilkan kinerja *heat pipe* terbaik.

## BAB 5

### KESIMPULAN

Pada penelitian kali ini, aplikasi nanofluida  $\text{TiO}_2$ -akuades sebagai fluida kerja dalam *sinter wick heat pipe* telah dilakukan. Dimulai dari pembuatan nanopartikel  $\text{TiO}_2$  dengan cara kopresipitas yang memiliki struktur *anatase*, nilai-nilai parameter kisi:  $a = 3.785 \text{ \AA}$  dan  $c = 9.155 \text{ \AA}$  dan ukuran rata-rata kristal yang diperoleh adalah 33nm. Karakterisasi sifat optis nanopartikel dengan UV-Vis menunjukkan nilai *band gap*-nya adalah 3.2 ev. Pengukuran ESR untuk melihat keadaan dari elektron tidak berpasangan dari nanopartikel  $\text{TiO}_2$  memiliki 4 nilai  $g$  yaitu:  $g=2.006$ ,  $g=2.003$ ,  $g=1.988$ ,  $g=1.977$ . Nilai  $g$  tersebut dicocokkan dengan studi litelatur, nilai  $g$  di atas 2 menunjukkan elektron tidak berpasangan dari oksigen dan di bawah 2 menunjukkan elektron tidak berpasangan dari Ti.

Setelah dikarakterisasi, nanopartikel tersebut dibuat menjadi Nanofluida menggunakan metode dua langkah dengan variasi konsentrasi yang dilakukan yaitu 0.05% Vol, 0.1% Vol, 0.5% Vol, 1% Vol, 3% Vol, 5% Vol. Sifat optis nanofluida dilakukan untuk melihat kestabilan nanofluida dengan variasi konsentrasi dan memastikan komposisi dalam nanofluida dengan UV-Vis. Puncak absorbansi diperoleh antara 280 nm sampai 350 nm, absorbansi dari nanofluida bertambah dengan meningkatnya konsentrasi, hal ini disebabkan semakin tinggi konsentrasi maka semakin banyak pula partikel-partikel di dalam nanofluida yang akan menyerap gelombang cahaya yang dipancarkan. Akan tetapi pada konsentrasi 3% vol dan 5% vol terjadi penurunan absorbansi di mana 3% vol dibawah 1% vol dan 5% vol di bawah 3% vol. Hal ini disebabkan pada konsentrasi tinggi nanofluida tidak terdispersi dengan baik yang disebabkan karena pada konsentrasi yang terlalu tinggi lebih mudah terjadi agregasi

Pengukuran konduktivitas panas menunjukkan konduktivitas panas meningkat dengan meningkatnya konsentrasi. Pada konsentrasi kecil peningkatan konduktivitas panasnya tidak terlalu signifikan namun pada konsentrasi 1% vol, 3% vol, 5% vol konduktivitas panas meningkat hingga 7.8%, 10.9%, 14.5% dibandingkan fluida dasarnya. Model Hamilton-Crosser dan model Xie tidak dapat menjelaskan fenomena peningkatan konduktivitas panas nanofluida karena hanya melihat konduktivitas panas sebagai pengaruh dari suspensi tanpa melihat interaksi-interaksi yang terjadi.

Karakterisasi nanofluida yang terakhir adalah viskositas, pengukuran dilakukan pada kecepatan putaran 100 RPM dan suhu 25<sup>0</sup>C. Peningkatan viskositas yang diperoleh menunjukkan korelasi dengan variasi konsentrasi. Pada nanofluida dengan konsentrasi 0.05% Vol hingga 1% Vol kenaikan viskositas tidak terlalu besar hanya di bawah 5% bila dibandingkan fluida dasarnya, baru pada konsentrasi 3% vol dan 5% vol kenaikan viskositas jauh lebih besar 14% dan 38.6%. Kenaikan viskositas ini sebanding dengan kenaikan konduktivitas panas akibat variasi konsentrasi. Perbandingan dengan model Einstein dan model Neilsen menunjukkan model Einstein berbeda jauh dengan hasil eksperimen, sedangkan model Nielsen cukup mendekati hingga konsentrasi 3% vol namun jauh berbeda dengan konsentrasi 5% vol.

Setelah dikarakterisasi, nanofluida dimasukkan ke dalam *heat pipe* untuk mempelajari pengaruh nanofluida dengan variasi konsentrasi sebagai fluida kerja di dalam *heat pipe*. *Heat pipe* yang digunakan adalah pipa tembaga yang dibuat lurus dengan ukuran panjang 200 mm dan diameter dalamnya 6 mm. Untuk bagian dalam pipa digunakan *sintered wick* yang dibuat dengan serbuk tembaga yang di-*sinter*, tebal *sinter wick* yang digunakan adalah 1.2 mm. Hasil yang diperoleh menunjukkan temperatur pada titik-titik evaporator berkurang dengan meningkatnya konsentrasi. Namun pada konsentrasi 3% vol dan 5% vol ternyata titik-titik evaporatornya lebih tinggi temperturnya dibandingkan pada konsentrasi 1%. Hasil pengukuran kinerja *heat pipe* yang dilakukan dengan konsentrasi yang semakin tinggi memiliki konduktivitas yang lebih tinggi, namun konsentrasi juga mempengaruhi viskositas.

Hal tersebut akan mempengaruhi koefisien penghantaran panasnya dan juga mempercepat agregasi.

Agregasi nanofluida mempengaruhi kinerja *heat pipe* yang telah dibuktikan hasil SEM dan EDX yang menunjukkan adanya unsur Ti yang menempel pada *sintered wick*. Pengukuran temperatur *heat pipe* yang sudah didiamkan selama 1 bulan bertujuan untuk melihat bagaimana kinerja *heat pipe* setelah terjadi agregasi yang dipengaruhi faktor waktu. Hasilnya menunjukkan kinerja *heat pipe* lebih rendah dibandingkan dengan saat pengukuran pertama kali bahkan bila dibandingkan dengan fluida kerja akuades. Akuades sebagai fluida kerja sedikit lebih baik performanya disebabkan agregasi yang terjadi menutupi pori-pori sehingga porositas dari *heat pipe* menjadi berkurang. Karena berkurangnya porositas pada *heat pipe* ini, kecepatan aliran fluida menjadi berkurang.

Pengukuran tambahan yang dilakukan adalah melihat pengaruh variasi sudut pada:  $0^{\circ}$ ,  $45^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$  dan pengaruh variasi jumlah fluida kerja: 40%, 60%, 80%. Pengaruh sudut tidak memberikan pengaruh yang signifikan sedangkan jumlah fluida kerja yang optimum adalah pada 60% walau nilai tersebut tidak terlalu mencolok bila dibandingkan dengan 40% dan 80% dari volume total *heat pipe*.

## DAFTAR ACUAN

- [1] Sarit K. Das, Stephen U. S. Choi, Wenhua Yu, T. Pradeep., NANOFLUID Science and Technology.: A JOHN WILEY & SONS, INC., 2007.
- [2] Yu, W., and S. U. S. Choi. , "The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: a renovated Maxwell model," J. Nanopar Res., vol. 5, pp. 167-171, 2003.
- [3] M. J. Pastoriza-Gallego, C. Casanova, R. Páramo, B. Barbés, J. L. Legido, and M. M. Piñeiro, "A study on stability and thermophysical properties (density and viscosity) of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in water nanofluid," JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, vol. 106, p. 064301, 2009.
- [4] Shung-Wen Kang, Wei-Chiang Wei, Sheng-Hong Tsai, Chia-Ching Huang, "Experimental investigation of nanofluids on sintered *heat pipe* thermal kinerjance," Applied Thermal Engineering, vol. 29, pp. 973-979, 2009.
- [5] Nandy Putra, Wayan Nata Septiadi, Haolia Rahman, Ridho Irwansyah, "Thermal kinerjance of screen mesh wick *heat pipes* with nanofluids," Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 40, pp. 10-17, 2012.
- [6] Rosari Saleh, Nandy Putra, Suhendro Purbo Prakoso, Wayan Nata Septiadi, "Experimental investigation of thermal conductivity and *heat pipe* thermal kinerjance of ZnO nanofluids," International Journal of Thermal Sciences, vol. 63, pp. 125-132, 2013.
- [7] Calvin C. Silverstein, Design and technology of *heat pipes* for cooling and heat exchange hand book.: Taylor & Francis, 1992.
- [8] Stephen U.S. Choi, "Nanofluids: from vision to reality through research," J. Heat Transfer, vol. 131, pp. 1-9, 2009.
- [9] Aida Nasiri, Mojtaba Shariaty-Niasar, Alimorad Rashidi, Azadeh Amrollahi, Ramin Khodafarin, "Effect of dispersion method on thermal conductivity and stability of nanofluid," Experimental Thermal and Fluid Science 35 (2011) 717–723, vol. 35, pp. 717-723, 2011.

- [10] J.A. Eastman, U.S. Choi, S. Li, L.J. Thompson, S. Lee, "Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids, Materials Research Society Symposium-Proceedings," Materials Research Society, Pittsburgh, PA, USA, Boston, MA, USA, vol. 467, pp. 3-11, 1997.
- [11] S. Lee, S.U.S. Choi, S. Li, J.A. Eastman, "Measuring thermal conductivity of fluids containing oxide nanoparticles," *Journal of Heat Transfer*, vol. 121, pp. 280-289, 1999.
- [12] X. Wang, X. Xu, S.U.S. Choi, "Thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture," *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, vol. 13, pp. 474-480, 1999.
- [13] J.A. Eastman, S.U.S. Choi, S. Li, W. Yu, L.J. Thompson, "Anomalous increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles," *Applied Physics Letters*, vol. 78, no. 6, pp. 718-720, 2001.
- [14] T.K. Hong, H.S. Yang, C.J. Choi, "Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids," *Journal of Applied Physics*, vol. 97, no. 6, pp. 1-4, 2005.
- [15] Hong TK, Yang HS., "Nanoparticle-Dispersion-Dependent Thermal Conductivity in Nanofluids 2005;47:S321-4," *J Korean Phys Soc*, vol. 47, pp. s312-4, 2005.
- [16] Laura Fedele, Laura Colla, Sergio Bobbo, "Viscosity and thermal conductivity measurements of water-based nanofluids containing titanium oxide nanoparticles," *international journal of refrigeration*, vol. 35, pp. 1359-1366, 2012.
- [17] Yurong He, Yi Jin, Haisheng Chen, Yulong Ding, Daqiang Cang, Huilin Lu, "Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO<sub>2</sub> nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 50, pp. 2272-2281, 2007.
- [18] S.M.S. Murshed, K.C. Leong, C. Yang, "Enhanced thermal conductivity of TiO<sub>2</sub>-water based nanofluids," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 44, pp. 367-373, 2005.
- [19] Z. L. Wang, D.W. Tang, S. Liu, X. H. Zheng, N. Araki, "Thermal-Conductivity and Thermal-Diffusivity Measurements of Nanofluids by  $3\omega$  Method and Mechanism Analysis of Heat Transport," *Int J Thermophys*, vol. 28, pp. 1255-1268, 2007.
- [20] B.C. Pak, Y.I. Cho, "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with sub micro metallic oxide particles," *Exp. Heat transfer*, vol. 11, p. 151, 1998.
- [21] X. Zhang, H. Gu, and M. Fujii, "Experimental Study on the Effective Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Nanofluids," *International Journal of*

- Thermophysics, vol. 27, pp. 569-580, March 2006.
- [22] A. Turgut, I. Tavman, M. Chirtoc, H. P. Schuchmann, C. Sauter, S. Tavman, "Thermal Conductivity and Viscosity Measurements of Water-Based TiO<sub>2</sub> Nanofluids," *Int J Thermophys*, vol. 30, pp. 1213-1226, 2009.
- [23] John Philip, P.D. Shima, "Thermal properties of nanofluids," *Advances in Colloid and Interface Science* 183–184 (2012) 30–45, vol. 183-184, pp. 30-45, 2012.
- [24] Sarit Kumar Das, Nandy Putra, Peter Thiesen, Wilfried Roetzel, "Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids," *Journal of Heat Transfer*, vol. 125, pp. 567-574, AUGUST 2003.
- [25] Tun-Ping Teng, Yi-Hsuan Hung, Tun-Chien Teng, Huai-En Mo, How-Gao Hsu, "The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity," *Applied Thermal Engineering*, vol. 30, pp. 2213-2218, 2010.
- [26] Elena V. Timofeeva, Jules L. Routbort, and Dileep Singh, "Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids," *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, vol. 106, p. 014304, 2009.
- [27] WANG Xian-Ju, LI Xin-Fang, "Influence of pH on Nanofluids' Viscosity and Thermal Conductivity," *CHIN. PHYS. LETT.*, vol. 26, no. 5, p. 056601, 2009.
- [28] X.F. Li, D.S. Zhu, X.J. Wang, N. Wang, J.W. Gao, H. Li, "Thermal conductivity enhancement dependent pH and chemical surfactant for Cu-H<sub>2</sub>O nanofluids," *Thermochimica Acta*, vol. 469, pp. 98-103, 2008.
- [29] Binglu Ruan and Anthony M Jacobi, "Ultrasonication effects on thermal and rheological properties of carbon nanotube suspensions," *Nanoscale Research Letters*, vol. 7, p. 127, 2012.
- [30] Ravi Prasher, Patrick E. Phelan and Prajesh Bhattacharya, "Effect of Aggregation Kinetics on the Thermal Conductivity of Nanoscale Colloidal Solutions (Nanofluid)," *NANO LETTERS*, vol. 6, no. 7, pp. 1529-1534, 2006.
- [31] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, 2nd Ed. Oxford, U.K: Clarendon Press, 1881.
- [32] Hamilton, R. L., and Crosser, O. K., "Thermal Conductivity of Heterogeneous Two Component Systems," *I & EC Fundamentals*, vol. 1~3, pp. 187-191, 1962.

- [33] Huaqing Xie, Motoo Fujii, Xing Zhang, "Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 48, no. 14, pp. 2926-2932, July 2005.
- [34] Jang SP, Choi SUS, "Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, pp. 4316-4318, 2004.
- [35] Keblinski P, Phillpot SR, Choi SUS, Eastman JA, "Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids)," *Int J Heat Mass Trans*, vol. 45, pp. 855-863, 2002.
- [36] Domingues G, Volz S, Joulain K, Greffet J-J, "Heat transfer between two nanoparticles through near field interaction," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 94, p. 085901, 2005.
- [37] Sergio Bobbo, Laura Fedele, Anna Benetti, Laura Colla, Monica Fabrizio, Cesare Pagura, "Viscosity of water based SWCNH and TiO<sub>2</sub> nanofluids," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 36, pp. 65-71, 2012.
- [38] Elena V. Timofeeva, Wenhua Yu, David M. France, Dileep Singh, and Jules L. Routbort, "Base fluid and temperature effects on the heat transfer characteristics of SiC in ethylene glycol/H<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>O nanofluids," *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, vol. 109, p. 014914, 2011.
- [39] ZHAO Jia-Fei, LUO Zhong-Yang, NI Ming-Jiang, CEN Ke-Fa, "Dependence of Nanofluid Viscosity on Particle Size and pH Value," *CHIN. PHYS. LETT.*, vol. 26, no. 6, p. 066202, 2009.
- [40] Lawrence E. Nielsen, "Generalized Equation for the Elastic Moduli of Composite Materials," *J. Appl. Phys.* 41, 4626 (1970), vol. 41, p. 4626, 1970.
- [41] David Reay and Peter Kew, *Heat pipes Theory, Design and Application Fifth Edition*. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann, 2006.
- [42] C.Y. Tsai, H.T. Chien, P.P. Ding, B. Chan, T.Y. Luh, P.H. Chen, "Effect of structural character of gold nanoparticles in nanofluid on *heat pipe* thermal kinerjance," *Mater. Lett.*, vol. 58, no. 9, pp. 1461-1465, 2004.
- [43] Paisarn Naphon, Pichai Assadamongkol, Teerapong Borirak, "Experimental investigation of titanium nanofluids on the *heat pipe* thermal efficiency," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 35, pp. 1316-1319, 2008.
- [44] R. Kempers, D. Ewing, C.Y. Ching, "Effect of number of mesh layers and fluid loading

- on the kinerjance of screen mesh wicked *heat pipes*," Applied Thermal Engineering, vol. 26, pp. 589-595, 2006.
- [45] Shung-Wen Kang, Wei-Chiang Wei, Sheng-Hong Tsai, Shih-Yu Yang, "Experimental investigation of silver nano-fluid on *heat pipe* thermal kinerjance," Applied Thermal Engineering, vol. 26, pp. 2377-2382, 2006.
- [46] Tun-Ping Teng, How-Gao Hsu, Huai-En Mo, Chien-Chih Chen, "Thermal efficiency of *heat pipe* with alumina nanofluid," Journal of Alloys and Compounds, vol. 504S, pp. S380-S384, 2010.
- [47] Yi-Hsuan Hung, Tun-Ping Teng, Bo-Gu Lin, "Evaluation of the thermal kinerjance of a *heat pipe* using alumina nanofluids," Experimental Thermal and Fluid Science, vol. xxx, pp. xxx-xxx, 2012.
- [48] Jacopo Buongiorno, David C. Venerus, Naveen Prabhat, Thomas McKrell, etc, "A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids," JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, vol. 106, p. 094312, 2009.
- [49] C S Jwo, T P Teng, C J Hung and Y T Guo, "Research and development of measurement device for thermal conductivity of nanofluids," Journal of Physics: Conference Series, vol. 13, pp. 55-58, 2005.
- [50] Dong Fang, Zhiping Luo, Kelong Huang, Dimitris C. Lagoudas, "Effect of heat treatment on morphology, crystalline structure and photocatalysis properties of TiO<sub>2</sub> nanotubes on Ti substrate and freestanding membrane," Applied Surface Science, vol. 257, pp. 6451-6461, 2011.
- [51] Azuchi Harano, Koji Shimada, Tatsuya Okubo and Masayoshi Sadakata, "Crystal phases of TiO<sub>2</sub> ultrafine particles prepared by laser ablation of solid rods," Journal of Nanoparticle Research, vol. 4, pp. 215-219, 2002.
- [52] Dorian A. H. Hanaor, Charles C. Sorrell, "Review of the *anatase* to *rutile* phase transformation," J Mater Sci, vol. 46, pp. 855-874, 2011.
- [53] Kimberly A. Gray, Gonghu Li, Nada M. Dimitrijevic, Le Chen, Jamie M. Nichols, Tijana Rajh, "The Important Role of Tetrahedral Ti<sup>4+</sup> Sites in the Phase Transformation and Photocatalytic Activity of TiO<sub>2</sub>," J. AM. CHEM. SOC., vol. 130, pp. 5402-5403, 2008.
- [54] Kimberly A. Gray, Deanna C. Hurum, Tijana Rajh and Marion C. Thurnauer, "Recombination Pathways in the Degussa P25 Formulation of TiO<sub>2</sub>: Surface versus

- Lattice mechanisms," *J. Phys. Chem. B*, vol. 109, pp. 977-980, 2005.
- [55] Kimberly A. Gray, Deanna C. Hurum, Alexander G. Agrios, Tijana Rajh and Marion C. Thurnaue, "Explaining the Enhanced Photocatalytic Activity of Degussa P25 Mixed-Phase TiO<sub>2</sub> Using EPR," *J. Phys. Chem. B*, vol. 107, pp. 4545-4549, 2003.
- [56] H. Chang, C. Jwo, P. Fan, S. Pai, "Process optimization and material properties for nanofluid manufacturing," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 34, no. 3, pp. 300-306, 2007.
- [57] Vijay S. Raykar, Ashok K. Singh, "Thermal and rheological behavior of acetylacetone stabilized ZnO nanofluids," *Thermochimica Acta*, vol. 502, pp. 60-65, 2010.
- [58] A. Ghadimi, R. Saidur, H.S.C. Metselaar, "A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, pp. 4051-4068, 2011.
- [59] S. Link, M.A. El-Sayed, "Optical properties and ultrafast dynamics of metallic nanocrystals," *Annu. Rev. Phys. Chem.*, vol. 54, no. 1, pp. 331-366, 2003.
- [60] U.V. Kreibig, M. Vollmer, *Optical Properties of Metal Clusters.*: Springer, 1995.
- [61] Tessy Theres Baby and S Ramaprabhu, "Investigation of thermal and electrical conductivity of graphene based nanofluids," *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, vol. 108, p. 124308, 2010.
- [62] Patricia E. Gharagozloo, and Kenneth E. Goodson, "Aggregate fractal dimensions and thermal conduction in nanofluids," *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, vol. 108, p. 074309, 2010.
- [63] Behnaz Tajik, Abbas Abbassi, Majid Saffar-Avval, Mehdi Ahmadi Najafabadi, "Ultrasonic properties of suspensions of TiO<sub>2</sub> and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles in water," *Powder Technology*, vol. 2012, pp. 171-176, 2012.
- [64] Lee, S., Choi, U. S., Li, S., and Eastman, J. A., "Measuring Thermal Conductivity of Fluids Containing Oxide Nanoparticles," *ASME J. Heat Transfer*, vol. 121, pp. 280-289, 1999.
- [65] Eastman, J. A., Choi, U. S., Li, S., Yu, W., and Thompson, L. J., "Anomalously Increased Effective Thermal Conductivities of Ethylene Glycol-Based Nanofluids Containing Copper Nanoparticles," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 78~6, pp. 718-720, 2001.

- [66] Keblinski, P., Phillpot, S. R., Choi, S. U. S., and Eastman, J. A., "Mechanism of Heat Flow in Suspension of Nano-Sized Particles (Nanofluids)," *Int. J. Heat Mass Transfer*, vol. 45, pp. 855-863, 2002.
- [67] Seok Pil Jang, Stephen U. S. Choi, "Effects of Various Parameters on Nanofluid Thermal Conductivity," *Journal of Heat Transfer*, vol. 129, pp. 617-623, May 2007.
- [68] Yongjin Feng, Boming Yu, Peng Xu and Mingqing Zou, "The effective thermal conductivity of nanofluids based on the nanolayer and the aggregation of nanoparticles," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 40, pp. 3164-3171, 2007.
- [69] Patricia E. Gharagozloo, Kenneth E. Goodson, "Temperature-dependent aggregation and diffusion in nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 54, pp. 797-806, 2011.
- [70] Gyoung-Ja Lee, □, Chang Kyu Kim, Min Ku Lee, Chang Kyu Rhee, Seokwon Kim, Chongyoun Kim, "Thermal conductivity enhancement of ZnO nanofluid using a one-step physical method," *Thermochimica Acta*, vol. 542, pp. 24-27, 2012.
- [71] Weerapun Duangthongsuk, Somchai Wongwises, "Measurement of temperature-dependent thermal conductivity and viscosity of TiO<sub>2</sub>-water nanofluids," *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 33, pp. 706-714, 2009.
- [72] K. B. Anoop, S. Kabelac, T. Sundararajan, and Sarit K. Das, "Rheological and flow characteristics of nanofluids: Influence of electroviscous effects and particle agglomeration," *J. Appl. Phys.*, vol. 106, p. 034909, 2009.
- [73] K.S. Suganthi, K.S. Rajan, "Temperature induced changes in ZnO–water nanofluid: Zeta potential, size distribution and viscosity profiles," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. xxx, p. xxx, 2012.
- [74] Kyu Hyung Do, Hyo Jun Ha, Seok Pil Jang, "Thermal resistance of screen mesh wick *heat pipes* using the water-based Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluids," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 53, pp. 5888-5894, 2010.
- [75] ZhenHua Liu, QunZhi Zhu, "Application of aqueous nanofluids in a horizontal mesh *heat pipe*," *Energy Conversion and Management* 52 (2011) 292–300, vol. 52, pp. 292-300, 2011.
- [76] M. T. Hamed Mosavian, S. Zeinali Heris, S. Gh. Etemad, M. Nasr Esfahany, "Heat transfer enhancement by application of nano-powder," *J Nanopart Res*, vol. 12, pp. 2611-2619, 2010.

- [77] B.C. Pak, Y.I. Cho, "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles," *Exp. Heat Transfer* 11 (1999) 151– 170., vol. 11, pp. 151-170, 1999.
- [78] Kunyaluck Kontapakdee, Joongjai Panpranot , Piyasan Praserthdam, "Effect of Ag addition on the properties of Pd–Ag/TiO<sub>2</sub> catalysts containing different TiO<sub>2</sub> crystalline phases," *Catalysis Communications*, vol. 8, pp. 2166-2170, 2007.
- [79] Dongsheng Wen, Guiping Lin, Saeid Vafaei, Kai Zhang, "Review of nanofluids for heat transfer applications," *Particuology*, vol. 7, pp. 141-150, 2009.

