

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Ding *et al.* (2006), meneliti CNT yang disuspensikan kedalam air murni dengan variasi konsentrasi CNT 0%, 0.1%, 0.25%, 0.5% dan juga ditambahkan *stabilizer* sebanyak 0.25% GA (*Gum Arabic*) yang diuji pada  $Re = 850$ . Hasil penelitian tersebut didapatkan pada penambahan 0.5% CNT memiliki peningkatan perpindahan kalor maksimum mencapai 350% yang terjadi pada  $x/D = 110$ . Dari penelitian tersebut dijelaskan mekanisme peningkatan perpindahan kalor yang memungkinkan adalah menipisnya kondisi batas termal karena adanya partikel nano, dimana partikel CNT memiliki *aspect ratio* yang tinggi.

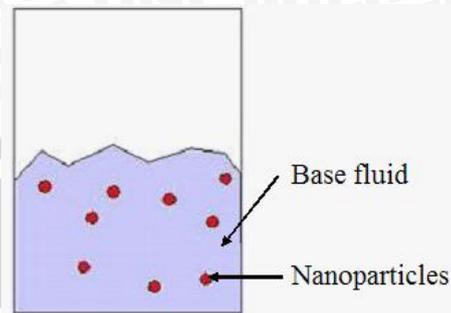
Han *et al.* (2007), meneliti nanopartikel kompleks jenis baru yang terdiri dari CNT dan alumina (*hybrid sphere*) yang dihasilkan dengan metode *spray pyrolysis* untuk meningkatkan perpindahan panas yang diaplikasikan pada fluida. Partikel *hybrid* tersebut menghasilkan peningkatan konduktivitas termal dari PAO (*poly alpha olefin*) oil sebesar 21% pada volume fraksi 0.2%.

Nine *et al.* (2012), meneliti *hybrid nanofluid* dengan mengkombinasikan *nanoparticle*  $Al_2O_3$  dengan CNT tipe *multi-walled carbon nanotube* (MWCNT) setelah perlakuan dan tanpa perlakuan dalam air. Dari penelitian tersebut menunjukkan sedikit inklusi partikel CNT kedalam  $Al_2O_3/water$  dapat mempengaruhi karakteristik termal secara signifikan dimana kestabilan nanofluida tidak menurun nilainya. Dalam penelitian ini juga didapatkan CNT setelah perlakuan terdispersi lebih baik dari pada tanpa perlakuan serta partikel dengan bentuk *sphere* memiliki peningkatan konduktivitas termal yang lebih kecil dari pada partikel dengan bentuk silindris.

### 2.2 Nanofluida

Nanofluida adalah suatu campuran atau suspensi antara fluida cair (yang disebut dengan fluida dasar) dengan partikel padat yang mempunyai ukuran nanometer atau  $10^{-9}$  m (nanopartikel). Partikel berukuran nano tersebut tersuspensi ke dalam fluida dasar seperti pada gambar 2.1, ukuran partikel sangat berpengaruh terhadap stabilitas partikel didalam fluida karena semakin besar ukuran partikel akan semakin cepat mengendap. Secara teori nanofluida ini memiliki konduktivitas termal yang lebih baik daripada fluida dasarnya, karena nanopartikel dari unsur logam memiliki konduktivitas termal

yang lebih tinggi dari fluida dasar yang umumnya berbentuk cairan. Adapun perbandingan nilai konduktivitas termal base fluid dengan partikel logam maupun non logam dapat dilihat pada gambar 2.2.

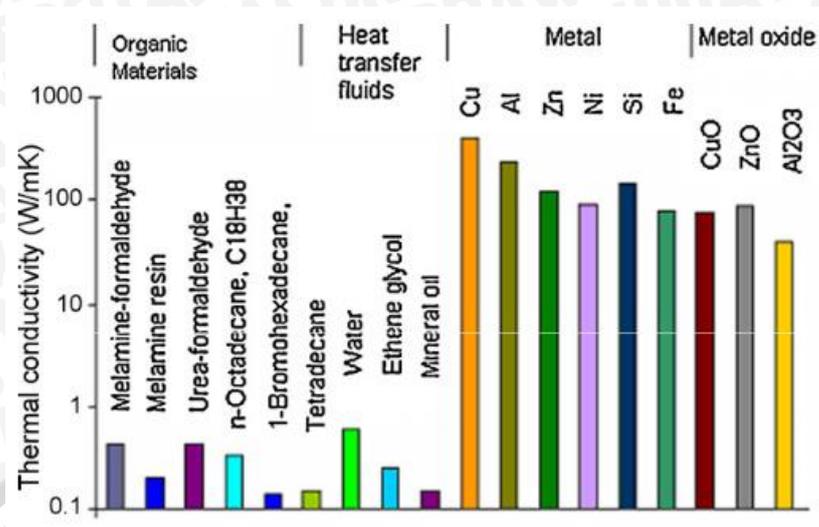


Gambar 2.1 Prinsip Nanofluida  
Sumber : Kavitha *et al.* (2012)

### 2.2.1 Konsep Nanofluida

Choi (1998) memperkenalkan istilah nanofluida, yaitu golongan baru fluida yang tersusun dari partikel berukuran nanometer (1-100 nm) pada fluida dasar yang bertujuan untuk memperbaiki *fluid properties* dari fluida dasar tersebut. Beberapa kelebihan dari nanofluida diantaranya :

1. Meningkatkan perpindahan kalor dan stabilitas karena nanofluida mempunyai luas permukaan relatif yang tinggi, dimana perpindahan kalor terjadi pada permukaan partikel.
2. Mengurangi daya pompa bila dibandingkan dengan fluida konvensional untuk mendapatkan intensifikasi perpindahan panas yang setara, karena pada fluida konvensional perpindahan kalor meningkat dengan bertambahnya kecepatan, sedangkan nanofluida memiliki konduktivitas yang lebih tinggi
3. Mengurangi penyumbatan saluran bila dibandingkan dengan mikropartikel.
4. *Properties* dapat diatur, termasuk konduktivitas termal dengan memvariasikan konsentrasi partikel sesuai aplikasi yang diinginkan.
5. Mendukung miniaturisasi sistem, karena sistem dapat dibuat lebih kecil dan ringan.
6. Menghemat energi dan biaya, karena dengan sistem yang semakin *compact* fluida yang dibutuhkan lebih sedikit.



Gambar 2.2 Konduktivitas termal berbagai material.  
 Sumber : Wen (2009)

Konsep nanofluida digunakan untuk meningkatkan efisiensi perpindahan kalor. Konsep ini banyak diaplikasikan pada pendingin mesin (*vehicle thermal management*), pendingin alat-alat elektronika, penukar kalor, sistem pendinginan reaktor nuklir, Pipa pemanas, *fuel cell*, pemanas tenaga matahari, *chillers*, mesin diesel, pengeboran, pelubrikasi, *thermal storage*, dll.

### 2.2.2 Pembuatan Nanopartikel

Menurut Kimoto *et al* (1963) pembuatan nanopartikel secara luas dibagi menjadi 2 kategori, yaitu proses fisika dan proses kimia. Sedangkan Yokoyama dan Huang (2005), pembuatan nanopartikel dibagi menjadi beberapa metode menurut fasanya seperti pada gambar 2.3, antara lain sebagai berikut :

a. Metode Fase Padat (*Solid Phase Method*)

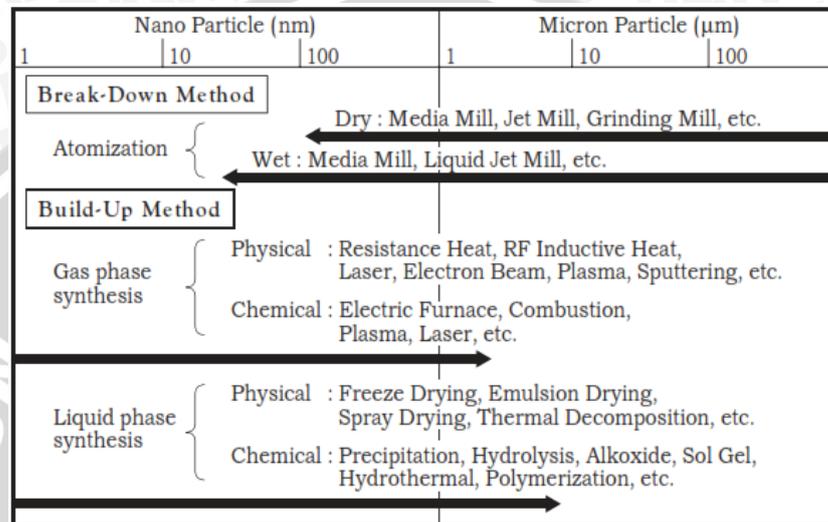
Pembuatan nanopartikel pada fase padat dilakukan dengan metode penggilingan (*grinding method*). Metode ini dilakukan pada kondisi kering dan basah, untuk kondisi kering dengan menggunakan *jet mill*, *grinding mill*, dll. Sedang pada kondisi basah menggunakan *liquid jet mill*.

b. Metode Fase Gas (*Gas Phase Method*)

Pembuatan dalam fase ini menggunakan beberapa metode kimiawi, perubahan fisika dan plasma. Secara fisika dilakukan dengan *laser*, *electron beam*, *sputtering*, dll. Sedangkan secara kimia dengan *electric furnace*, *laser*, pembakaran, dll.

c. Metode Fase Cair (*Liquid Phase Method*)

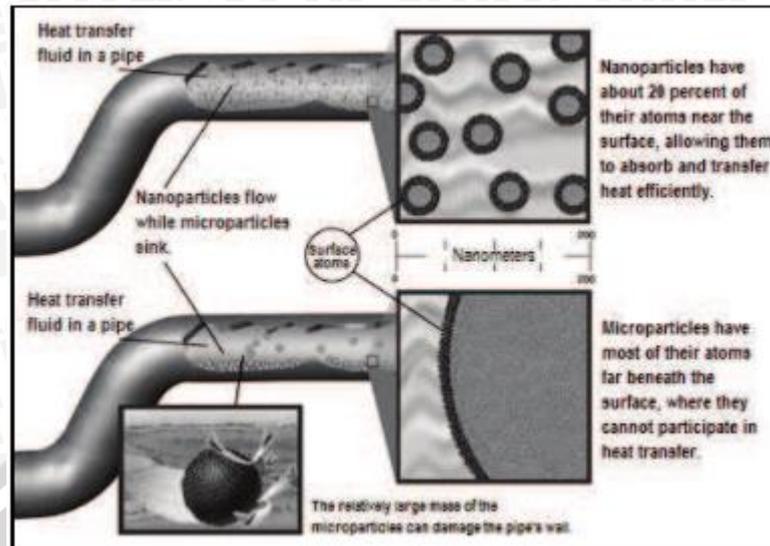
Pembuatan pada fase ini dengan menggunakan metode secara fisika dan kimia. Untuk pembuatan secara fisika menggunakan *freeze drying*, *emulsion drying*, *thermal decomposition*, dll. Sedangkan untuk metode kimiawi dengan *hydrolysis*, *hydrothermal*, polimerisasi, dll.



Gambar 2.3 Metode pembuatan nanopartikel dan mikropartikel  
Sumber : Yokoyama *et al.* (2005)

Karena ukurannya yang sangat kecil, maka nanopartikel memiliki beberapa keistimewaan dibandingkan dengan mikropartikel, dari gambar 2.4 terlihat perbedaan yang signifikan antara nanopartikel dan mikropartikel, diantaranya :

- Nanopartikel mampu terdispersi lebih lama dalam fluida dibanding mikropartikel karena semakin kecil ukuran partikel gerak Brownian semakin dominan, dan bisa terdispersi semakin lama jika ditambahkan dengan *surfactants* atau *stabilizer*.
- Luas permukaan per unit volume dari nanopartikel sekitar 1000 kali lebih tinggi daripada mikropartikel, artinya pelepasan kalor menjadi lebih cepat karena  $A_{\text{nanopartikel}} > A_{\text{mikropartikel}}$ .
- Meminimalkan terjadinya *clogging* atau penyumbatan pada saluran dibandingkan dengan mikropartikel.

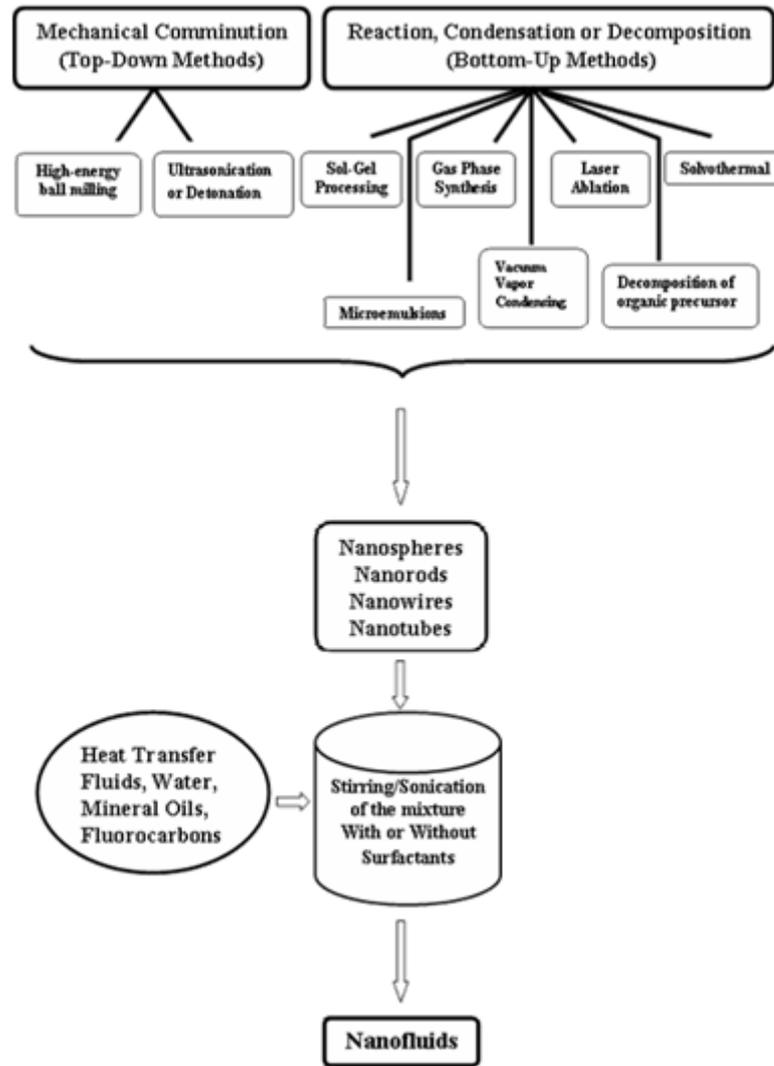


Gambar 2.4 Perbandingan Nanopartikel dengan Mikropartikel  
Sumber: Murshed *et al.* (2011)

### 2.2.3 Pembuatan Nanofluida

Secara garis besar, ada dua metode dasar yang dikembangkan untuk menghasilkan nanofluida yaitu:

1. Metode *Single Step*, di mana proses pembuatan nanopartikel dan pendispersiannya ke dalam fluida dilakukan sekaligus dalam satu tahapan di dalam fluida dasarnya. Salah satu pembuatan nanofluida dengan *single-step Method* adalah menggunakan teknik reduksi kimia untuk membuat partikel nano yang kemudian langsung didispersikan ke fluida dasarnya
2. Metode *Two Step*, di mana proses pembuatan nanopartikel dan pendispersiannya ke dalam fluida tidak dilakukan secara sekaligus dalam tempat yang sama (di fluida dasarnya). Proses pembuatan nanopartikel dan proses pendispersinya adalah proses yang terpisah. Dengan metode ini, partikel nano dilarutkan dalam fluida dasar dan umumnya menggunakan peralatan pengaduk dengan *ultrasonic vibrator* atau *sonication* untuk mendispersikan partikel dengan atau tanpa *surfactant* untuk mengurangi pengendapan. Tahapan pembuatan nanofluida dengan metode *two-step* dapat dilihat pada gambar 2.5.



Gambar 2.5 Pembuatan Nanofluida dengan Metode *Two-Step*  
 Sumber : Han *et al.* (2007)

Untuk nanopartikel, jenis-jenis material yang digunakan antara lain:

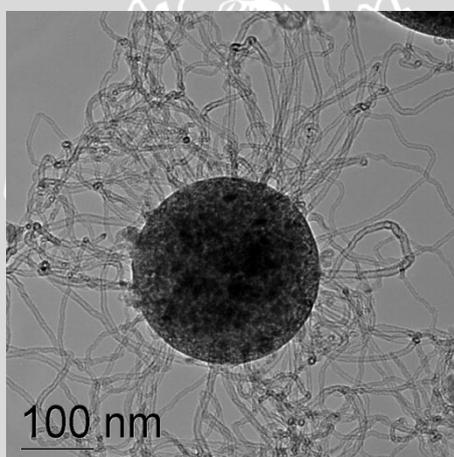
- Oksida keramik ( $Al_2O_3$ , CuO)
- Logam ( Cu, Ag, Au)
- Semikonduktor ( $TiO_2$  , SiC)
- *Carbon Nanotubes* (CNTs)
- Material komposit ( $Al_{70}Cu_{30}$ )

Sedangkan fluida dasar yang digunakan, antara lain:

- Air
- *Ethylene Glycole*
- *Engine Oil*
- *Bio-fluids*

### 2.2.4 Teknologi *Hybrid Nanofluid*

Han *et al* (2007) mengembangkan nanopartikel hybrid (*hybrid sphere*) yang terbentuk dari carbon nanotube yang disematkan pada nanopartikel alumina seperti pada gambar 2.6. Pada nanopartikel hybrid, kalor diharapkan berpindah dengan cepat dari satu CNTs ke yang lain melewati pusat partikel alumina dan mengurangi kontak resistan termal diantara CNTs dibandingkan dengan CNTs biasa yang terdispersi dalam fluida. CNTs mempunyai konduktivitas termal yang sangat tinggi ( $\sim 3000$  W/m.K), tetapi resistan termal antara CNTs dengan fluida mempunyai performa yang terbatas pada nanofluida. Nanopartikel hybrid dapat menghasilkan peningkatan konduktivitas termal yang lebih tinggi dalam nanofluida relatif dengan nanopartikel biasa pada konsentrasi yang sama. Gerak Brownian dari partikel merupakan faktor penting dalam peningkatan konduktivitas termal nanofluida.



Gambar 2.6 Foto TEM nanopartikel *hybrid sphere* CNTs dihasilkan dari metode *aerosol*  
Sumber : Han *et al.* (2007)

### 2.3 Perpindahan Kalor Konduksi

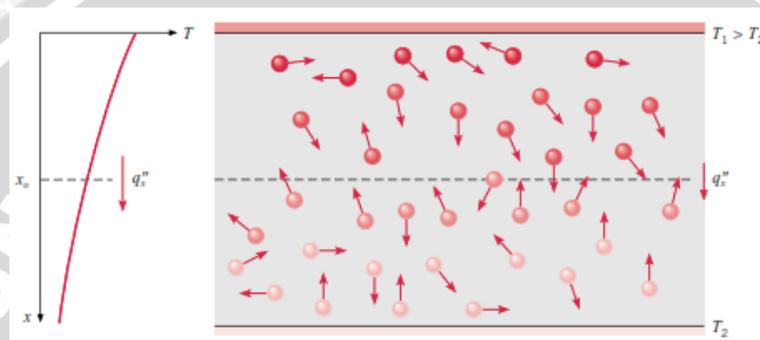
Konduksi adalah proses perpindahan energi dari partikel berenergi tinggi pada suatu substansi ke partikel berenergi lebih rendah yang berdekatan sebagai hasil dari interaksi antar partikel. Perpindahan kalor konduksi dapat terjadi pada material padat, cair dan gas. Pada cairan dan gas, konduksi terjadi karena tumbukan dan difusi dari molekul selama gerakan acak molekul (Cengel,1998:20), seperti pada gambar 2.7.

Tingkat konduksi melalui penampang sebanding dengan beda suhu sepanjang penampang dan luas permukaan perpindahan kalor, tetapi berbanding terbalik dengan ketebalan penampang. Secara umum konduksi dapat dinyatakan dalam persamaan :

$$Q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{Cengel, 1998:20}) \quad (2-1)$$

Dari persamaan konduksi terdapat konstanta  $k$  atau konduktivitas termal. Konduktivitas termal suatu material didefinisikan sebagai tingkat perpindahan panas melalui satuan ketebalan dari suatu material tiap satuan luas penampang per beda temperatur. Berdasarkan persamaan Fourier, konduktivitas termal didefinisikan,

$$k = \frac{q_s}{\partial T / \partial x} \quad (\text{Cengel, 1998:20}) \quad (2-2)$$



Gambar 2.7 Konduksi dengan Difusi Molekul  
Sumber : Incropera *et al.* (2005 : 492)

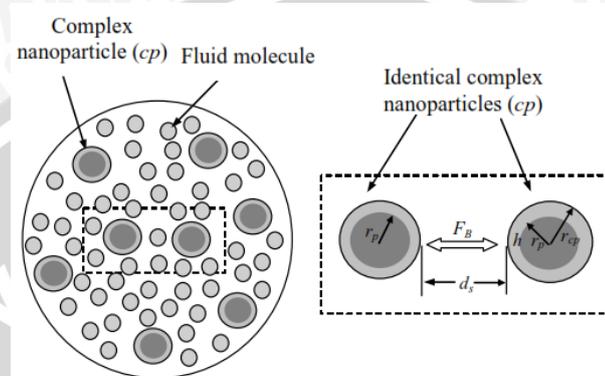
### 2.3.1 Mekanisme Peningkatan Konduksi pada Nanofluida

Keblinski *et al* (2002) menjelaskan anomali peningkatan konduktivitas termal pada nanofluida dengan mengungkapkan berbagai kemungkinan, diantaranya adalah gerak Brownian pada nanopartikel, liquid layer pada permukaan partikel/fluida, perpindahan kalor alami pada partikel, efek gugusan partikel nano.

#### A. Gerak Brownian Partikel Nano

Gerak Brownian merupakan gerakan acak dari nanopartikel yang dimasukkan dalam fluida dan terjadi interaksi antara partikel dengan molekul fluida di sekitarnya. Gerak Brownian pada makropartikel sangat kecil dan dapat diabaikan, tetapi pada partikel berukuran nano, gerak brownian menjadi signifikan. Gerak Brownian terjadi karena reaksi partikel koloid (nanopartikel) dengan molekul medium dispersi. Intensitas gerakan tergantung pada ukuran partikel dan viskositas medium dispersi. Semakin kecil ukuran partikel dan kekentalan medium dispersi, maka semakin kuat gerak Brownian dan sebaliknya.

Kavitha *et al.* (2012) menjelaskan kontribusi gerak brownian nanopartikel terhadap peningkatan konduktivitas termal nanofluida melalui 2 cara, yaitu kontribusi langsung dengan gerakan nanopartikel yang memindahkan panas dan kontribusi tidak langsung dengan konveksi mikro fluida pada sekeliling nanopartikel. Prasher *et al* (2006) menyimpulkan bahwa konveksi yang disebabkan oleh gerak brownian dari nanopartikel menyebabkan peningkatan konduktivitas termal dari nanofluida.



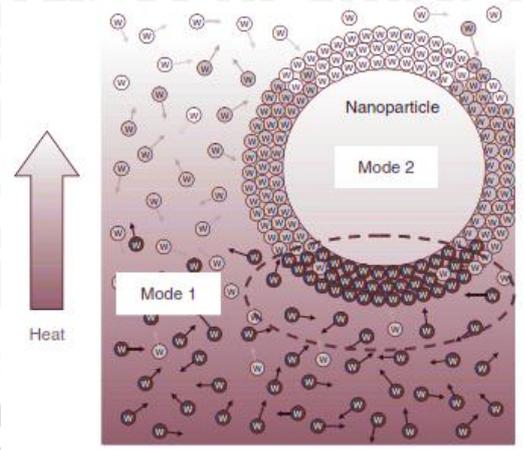
Gambar 2.8 Konsep Gerak Brownian Nanopartikel  
Sumber : Murshed *et al.* (2011)

Berdasarkan gambar 2.8, kontribusi langsung gerak Brownian terhadap konduktivitas termal dimana konduktivitas termal dinamis ( $k_{dy}$ ) dari suspensi akibat gerak Brownian nanopartikel dapat dinyatakan sebagai;

$$k_{dy} = \frac{1}{2} \rho_{cp} c_{p-cp} d_s \sqrt{\frac{3K_B T (1 - 1.5\gamma^3 \phi_p)}{2\pi \rho_{cp} \gamma^3 r_p^3}} \quad (\text{Murshed } et al, 2011) \quad (2-3)$$

### B. Liquid Layering Pada Permukaan Partikel

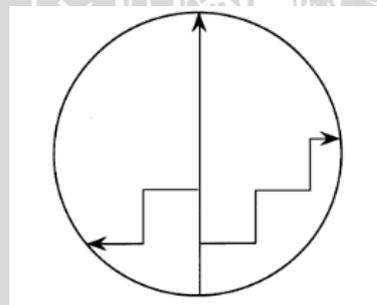
Efek antar muka yang dapat meningkatkan konduktivitas termal adalah liquid layering pada permukaan partikel padat, dimana struktur atom dari lapisan cair lebih tertata signifikan dari pada bulk liquid. Struktur kristal padat menunjukkan perpindahan panas yang lebih baik dari pada liquid, pelapisan cairan antar permukaan diharapkan dapat meningkatkan konduktivitas termal (Keblinski *et al*, 2002). Sedangkan Han *et al.* (2007) menjelaskan adanya lapisan molekul liquid pada permukaan partikel tidak semata-mata menyebabkan peningkatan konduktivitas termal karena mekanisme ini hanya berlaku untuk ukuran partikel lebih kecil dari 10 nm. Teori lain yang mendukung adalah *Kapitza resistance* yang merupakan diskontinuitas temperature antar muka solid dengan liquid. Ilustrasi konsep dapat dilihat pada gambar 2.9 mode 2.



Gambar 2.9 Liquid Layering pada Partikel  
Sumber : Das *et al.* (2007: 194)

### C. Natural Heat Transport

Keblinski *et al.* (2002) menjelaskan pada struktur Kristal pada seperti yang digunakan pada nanofluida, panas dibawa oleh phonon karena getaran atom-atomnya seperti terlihat pada gambar 2.9 mode 1 . Efek tumbukan phonon dapat meningkatkan konduktivitas termal secara signifikan. Pada partikel, jika tumbukan phonon dimulai dari satu partikel dapat berlangsung dalam cairan dan mendekati partikel lain, peningkatan konduktivitas termal besar karena *mean free path* dari phonon lebih pendek dalam cairan daripada pada partikel seperti terlihat pada gambar 2.10.

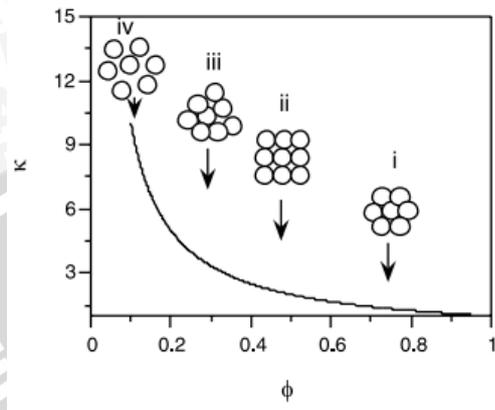


Gambar 2.10 Skema Mekanisme Difusi Phonon Pada Partikel  
Sumber : Keblinski *et al.* (2002)

### D. Efek Agregat Partikel Nano

Keblinski *et al.* (2002) dalam penelitiannya menemukan volume spesifik agregat bias lebih besar dari volume fisik dari partikel dan panas dapat berpindah dengan cepat karena volume fraksi dari fase dengan konduktivitas tinggi lebih besar dari volume fraksi partikel sehingga dapat meningkatkan konduktivitas termal secara signifikan.

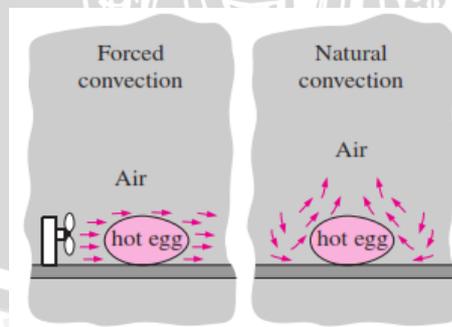
Berdasarkan gambar 2.11, Han *et al.* (2007) berpendapat bahwa agregat yang besar cenderung mengakibatkan penurunan konduktivitas termal. Ukuran partikel dan agregat merupakan faktor penting dalam peningkatan konduktivitas termal dari nanofluida.



Gambar 2.11 Efek Agregat Partikel Nano Pada Konduktivitas Termal  
 Sumber : Koblinski *et al.* (2002)

### 2.4 Perpindahan Kalor Konveksi

Konveksi adalah cara perpindahan kalor dimana kalor berpindah dari dinding padat yang dipengaruhi oleh aliran fluida yang berbatasan dengan dinding. Secara luas konveksi dibagi menjadi konveksi natural dan konveksi paksa. Seperti pada gambar 2.12, konveksi natural terjadi dimana aliran dihasilkan dari *buoyancy force* selama pemanasan atau pendinginan suatu fluida, sedangkan konveksi paksa terjadi bila fluida dibuat mengalir dengan bantuan perantara luar seperti pompa, kompresor, fan atau blower pada permukaan penerima kalor (Das *et al.* 2007).



Gambar 2.12 Konveksi Paksa dan Konveksi Natural  
 Sumber : Cengel (1998 : 26)

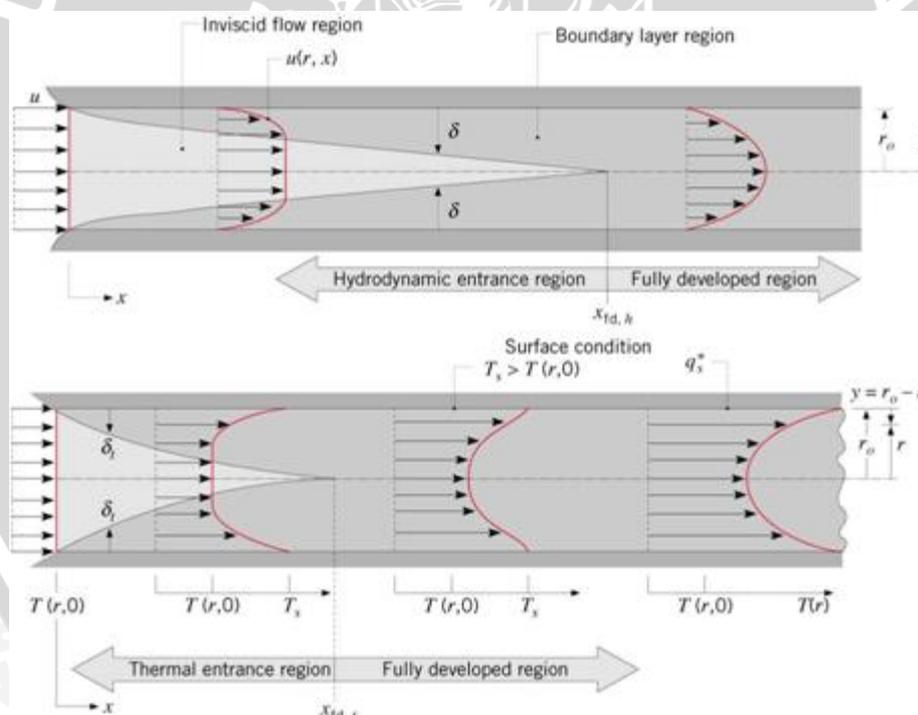
Dasar dari prinsip perpindahan kalor konveksi telah dinyatakan oleh Newton yang kini disebut dengan *Newton's law of cooling*. Hukum Newton tentang pendinginan secara sederhana menjelaskan bahwa perpindahan kalor konveksi sebanding dengan

perbedaan temperatur antara dinding dengan fluida. Hukum Newton tentang pendinginan dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$Q = h A (T_w - T_b) \rightarrow q = h (T_w - T_b) \quad (\text{Cengel, 1998:335}) \quad (2-4)$$

#### 2.4.1 Karakteristik Aliran Dalam Tube (*Circular Tube*)

Dengan menganggap fluida memasuki tube dengan kecepatan uniform pada aliran laminar, ketika fluida membuat kontak dengan permukaan, efek viskositas berpengaruh dan lapisan batas berkembang dengan peningkatan  $x$  (Incropera, 2005:486). Seperti pada gambar 2.13, lapisan ini juga dapat mengakibatkan fluida pada lapisan berangsur melambat karena gesekan. Untuk memperbaiki pengurangan kecepatan ini, kecepatan fluida di daerah tengah *tube* harus ditingkatkan untuk menjaga laju aliran massa tetap konstan, sebagai hasilnya lapisan batas kecepatan berkembang sepanjang *tube*. Ketebalan lapisan batas ini meningkat dalam arah aliran sampai lapisan batas mencapai tengah tube dan mengisi seluruh tube (Cengel, 1998:423).



Gambar 2.13 *Boundary Layer* pada *Tube*  
Sumber : Incropera *et al* (2005 : 492)

Daerah dari sisi masuk tube ke titik dimana lapisan batas menyatu pada garis tengah disebut *hydrodynamic entrance region*, dan panjang dari daerah ini disebut *hydrodynamic entry length*  $L_h$ . Daerah aliran sepanjang lapisan batas termal

berkembang dan mencapai tengah tube disebut *thermal entrance region* dan panjang dari daerah ini disebut *thermal entry length*  $L_t$  (Cengel, 1998:423).

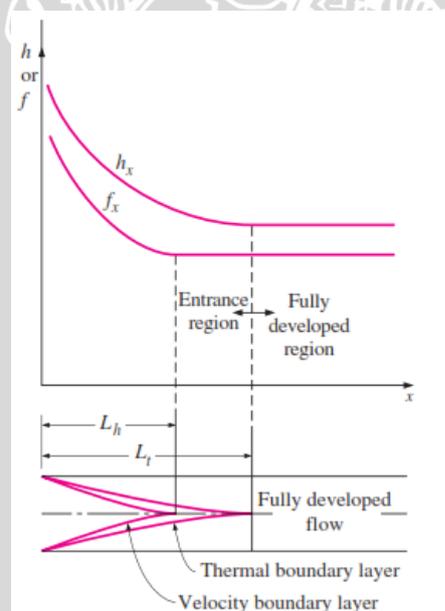
*Hydrodynamically fully developed* :

$$\frac{\partial V(r, x)}{\partial x} = 0 \rightarrow V = V(r)$$

*Thermally fully developed* :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[ \frac{T_s(x) - T(r, x)}{T_s(x) - T_m(x)} \right] = 0 \quad (\text{Cengel, 1998:424}) \quad (2-5)$$

Selama aliran laminar di dalam tube, derajat tak berdimensi dari angka Prandtl  $Pr$  diukur dari pertumbuhan relatif dari lapisan batas kecepatan dan termal. Untuk fluida dengan  $Pr \sim 1$  seperti gas, kedua lapisan batas menyatu seperti ditunjukkan pada gambar 2.14. Fluida dengan  $Pr > 1$  seperti minyak, lapisan batas kecepatan menjadi lebih besar dari lapisan batas termal. Hasilnya panjang sisi masuk hidrodinamik lebih kecil daripada panjang masukan termal, sebaliknya untuk fluida dengan  $Pr < 1$  berupa logam cair (Cengel, 1998:424).



Gambar 2.14 Lapisan Batas Kecepatan dan Lapisan Batas Termal

Sumber : Cengel (1998 : 425)

Dari gambar diatas dianggap fluida terpanasi dalam tube yang dilewati aliran, faktor gesekan dan koefisien perpindahan kalor konveksi paling tinggi pada saluran masuk tabung dimana ketebalan lapisan batas adalah nol, dan berangsur berkurang sampai aliran *fully developed*.

Suhu permukaan pada aliran kalor konstan dapat ditentukan dengan persamaan,

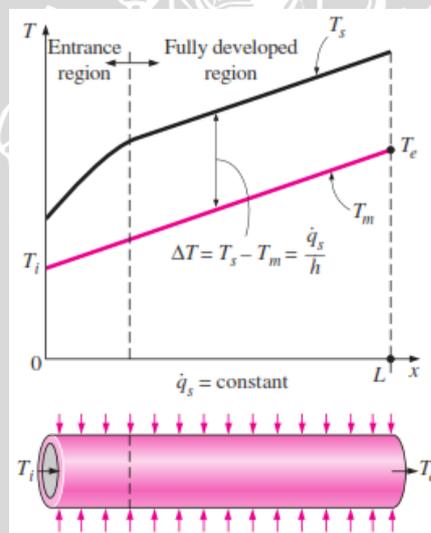
$$\dot{q}_s = h(T_w - T_b) \rightarrow T_w = T_b + \frac{\dot{q}_w}{h} \quad (\text{Cengel, 1998:427}) \quad (2-6)$$

Koefisien perpindahan kalor konveksi  $h$  dapat didefinisikan,

$$h(x) = \frac{q}{T_w(x) - T_b(x)}$$

Pada daerah *fully developed*, suhu permukaan  $T_s$ , juga akan meningkat secara linier dalam aliran karena  $h$  konstan dan  $T_w - T_b = \text{konstan}$  seperti ditunjukkan pada gambar 2.15. Pada aliran *fully developed* dalam *tube* dengan perpindahan kalor permukaan konstan, gradien suhu tidak bergantung pada  $x$  dan bentuk dari profil temperatur tidak berubah sepanjang tube, sehingga ;

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{dT_s}{dx} = \frac{dT_m}{dx} = \frac{2\dot{q}_s}{\rho v_m C_p R} = C \quad (\text{Cengel, 1998:428}) \quad (2-7)$$



Gambar 2.15 Variasi temperatur rata-rata fluida sepanjang *tube* pada *constant surface heat flux*.

Sumber : Cengel (1998 : 427)

## 2.5 Fluid Properties

### 2.5.1 Massa Jenis

Massa jenis atau *density* didefinisikan sebagai massa cairan per satuan volume. Secara umum, massa jenis dipengaruhi oleh tekanan dan temperatur. Perhitungan massa jenis nanofluid (*effective density*) dihitung atas dasar campuran (*mixture*) dua zat yang berbeda.

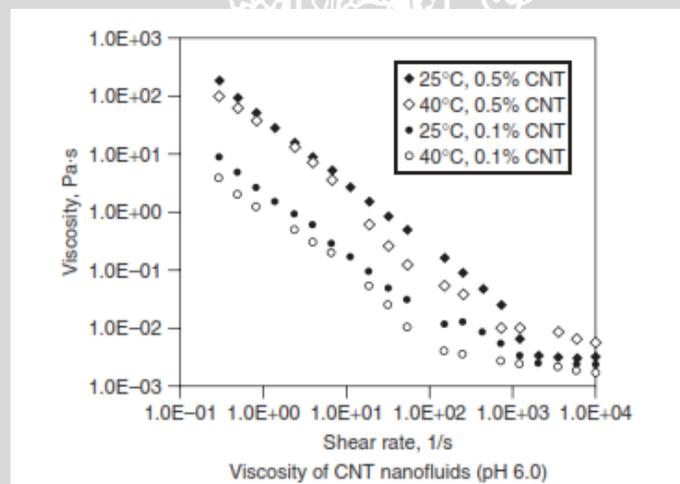
Densitas nanofluida ( $\rho_{eff}$ ) :

$$\rho_{eff} = (1 - \phi_p)\rho_b + \phi_p\rho_p \quad (\text{Das et al, 2007}) \quad (2-8)$$

### 2.5.2 Viskositas

Kekentalan atau viskositas adalah karakteristik fluida yang diartikan sebagai ketahanan fluida terhadap laju deformasi atau resistansi internal pada fluida untuk mengalir. Viskositas fluida didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan geser dengan laju regangan geser. Hubungan tegangan geser dengan viskositas dapat dilihat pada gambar 2.16, dimana viskositas akan menurun dengan bertambahnya tegangan geser. Pada tahun 1906, Einstein mengembangkan model persamaan viskositas untuk partikel solid yang terdispersi pada dilute fluid:

$$\mu = \mu_f(1 + 1.25\phi) \quad (\text{Han et al, 2007}) \quad (2-9)$$



Gambar 2.16 Hubungan Tegangan Geser dan Viskositas  
Sumber : Das et al (2007 : 236)

### 2.5.3 Kapasitas Kalor

Kapasitas kalor merupakan energi yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur satu derajat pada satuan massa dari suatu zat. Kapasitas kalor adalah kuantitas massa spesifik yang pengaruhnya tergantung pada massa jenis dari campuran komponen. Terdapat dua persamaan untuk menentukan kalor spesifik dari nanofluida :

$$c_{p,nf} = (1 - \phi)c_{p,f} + \phi c_{p,p} \quad (\text{Han et al, 2007}) \quad (2-10)$$

$$(\rho c_p)_{nf} = (1 - \phi)(\rho c_p)_f + \phi(c_p)_p$$

## 2.5.4 Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal suatu material didefinisikan sebagai tingkat perpindahan panas melalui satuan ketebalan dari suatu material tiap satuan luas penampang per beda temperatur. Konduktivitas merupakan kemampuan suatu material merambatkan panas. Maxwell (1881) meneliti tentang konduktivitas dari suspensi fluida yang terdiri dari partikel solid, kemudian menyatakan dengan persamaan konduktivitas termal efektif dari suspensi fluida tersebut :

$$k_{\text{eff}} = \frac{k_p + 2k_f + 2(k_p - k_f)\phi}{k_p + 2k_f - (k_p - k_f)\phi} k_f \quad (\text{Han et al, 2007}) \quad (2-11)$$

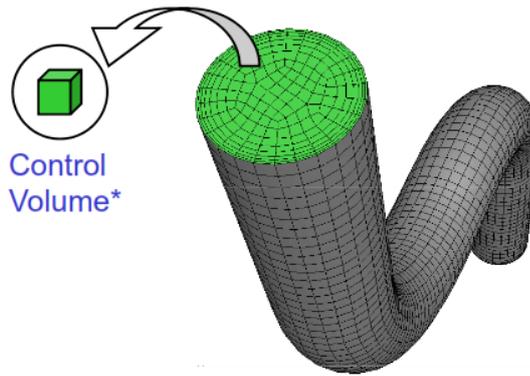
## 2.6 Software ANSYS Workbench

### 2.6.1 ANSYS FLUENT

FLUENT merupakan salah satu bagian dari *software* ANSYS Workbench. FLUENT yang berbasis *Computational Fluid Dynamic* (CFD) dengan menggunakan metode *Finite Volume Method*, adalah suatu program yang dapat dipakai untuk menyelesaikan masalah – masalah dalam bidang rekayasa (*engineering*) seperti aliran fluida, perpindahan kalor dan massa, reaksi kimia dan fenomena lain yang berhubungan dengan fluida dengan memecahkan masalah secara numerik dari persamaan matematis pembangun (*Governing Equation*). *Governing Equation* yang digunakan dalam FLUENT adalah persamaan kontinuitas, kekekalan energi dan kekekalan momentum.

Di dalam ANSYS Workbench juga terdapat CFX yang fungsinya hampir sama dengan FLUENT yang juga menggunakan metode *control volume*, akan tetapi terdapat perbedaan orientasi dimana FLUENT menggunakan *cell-centered* sedangkan CFX *node centered*. FLUENT bekerja dengan langkah-langkah berikut :

- Domain fisik didiskretisasi ke dalam set *finite control volume* seperti pada gambar 2.17.
- *Governing Equation* berupa persamaan kekekalan (transport) untuk massa, momentum dan energi diselesaikan pada set *control volume*.
- Persamaan diferensial parsial didiskretisasi kedalam sistem menjadi persamaan aljabar.
- Persamaan aljabar kemudian diselesaikan secara numerik untuk mendapatkan pemecahan masalah.



Gambar 2.17 Diskretisasi Control Volume  
 Sumber : ANSYS Inc. (2010)

**2.6.2 Mixture Model**

*Mixture model* atau model campuran merupakan model multifasa yang disederhanakan yang dapat digunakan untuk memodelkan aliran multifasa dimana terdapat fasa primer dan sekunder yang bergerak pada kecepatan berbeda, ilustrasi pada gambar 2.18. Model campuran merupakan penyederhanaan dari pendekatan secara Eulerian yang berdasar pada asumsi bilangan Stokes yang kecil. Model campuran dapat memodelkan n fasa (fluida atau particulate) dengan memecahkan persamaan momentum, kontinuitas dan energi untuk campuran, persamaan volume fraksi untuk fasa sekunder dan persamaan aljabar untuk kecepatan relatif.

Persamaan kontinuitas untuk campuran adalah;

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = 0 \tag{2-11}$$

dimana  $\vec{v}_m$  adalah kecepatan massa rata-rata campuran.

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \tag{2-12}$$

dan  $\rho_m$  adalah massa jenis campuran

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k \tag{2-13}$$

dimana  $\phi_k$  adalah volume fraksi pada fase k

Persamaan momentum untuk *mixture model* terdiri dari penjumlahan persamaan momentum pada fase primer dan sekunder, dapat dinyatakan dengan:



$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \phi_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \quad (2-14)$$

dimana n adalah jumlah fase,  $\vec{F}$  adalah gaya dan  $\mu_m$  adalah viskositas campuran,

$$\mu_m = \sum_{k=1}^n \phi_k \mu_k \quad (2-15)$$

$\vec{v}_{dr,k}$  adalah *drift velocity* atau kecepatan rata-rata akibat tumbukan partikel, untuk fase sekunder k :

$$\vec{v}_{dr,k} = \vec{v}_k - \vec{v}_m \quad (2-16)$$

Persamaan energi untuk campuran :

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\phi_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n (\phi_k \vec{v}_k (\rho_k E_k + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (2-17)$$

$$k_{eff} \text{ adalah konduktivitas efektif, } k_{eff} = \sum \phi_k (k_k + k_t) \quad (2-18)$$

Persamaan sebelah kanan merupakan persamaan yang menyatakan perpindahan energi untuk konduksi,  $S_E$  dalam persamaan diatas merupakan *source energy* yang dimiliki fluida.

$$E_k = h_k - \frac{p}{\rho_k} + \frac{v_k^2}{2} \quad (2-19)$$

Kecepatan relatif

Kecepatan relatif disini merupakan kecepatan dari fase sekunder (p) relatif terhadap kecepatan fase primer (q).

$$\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p - \vec{v}_q \quad (2-20)$$

fraksi massa pada fase k

$$c_k = \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \quad (2-21)$$

*drift velocity* dan kecepatan relatif memiliki hubungan dengan persamaan :

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_{pq} - \sum_{k=1}^n c_k \vec{v}_{qk} \quad (2-22)$$

Pada *mixture model*, asumsi dasar model aljabar *slip mixture* untuk mendefinisikan hubungan aljabar antara kecepatan relatif, kesetimbangan fase harus tercapai pada skala yang pendek. Menurut Manninen *et al.* (1996) persamaan kecepatan relatif :

$$\vec{v}_{pq} = \frac{\tau_p(\rho_p - \rho_m)\vec{a}}{f_{drag}\rho_p} \quad (2-23)$$

dimana  $\tau_p$  adalah waktu relaksasi partikel yang didefinisikan sebagai konstanta waktu peluruhan eksponensial dari kecepatan partikel karena *drag*.

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu_q} \quad (2-24)$$

$d$  adalah diameter dari partikel pada fase sekunder ( $p$ ),  $\vec{a}$  adalah percepatan partikel fase sekunder.  $f_{drag}$  merupakan koefisien drag, pada penelitian ini  $f_{drag}$  diambil dari Schiller dan Naumann yang dipakai sebagai pengaturan *default* oleh FLUENT.

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0.15 \text{Re}^{0.687} & \rightarrow \text{Re} \leq 1000 \\ 0.0183 \text{Re} & \rightarrow \text{Re} > 1000 \end{cases} \quad (2-25)$$

$$\text{dimana } \text{Re}_p = \frac{V_m d_p}{\nu_{eff}}$$

percepatan nanopartikel  $\vec{a}$

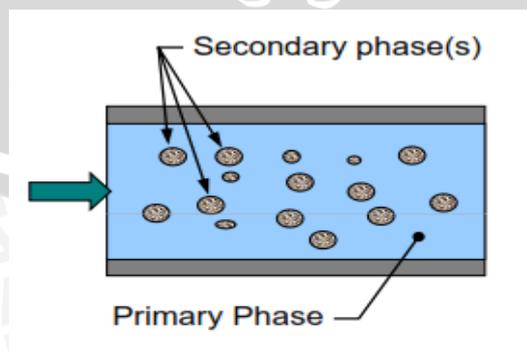
$$\vec{a} = \vec{g} - (\vec{v}_m \cdot \nabla) \vec{v}_m - \frac{\partial \vec{v}_m}{\partial t} \quad (2-26)$$

Persamaan volume fraksi untuk fase sekunder

Dari persamaan kontinuitas untuk fase sekunder  $p$ , persamaan volume fraksi untuk fase sekunder  $p$  dapat dinyatakan dengan :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi_p \rho_p) + \nabla \cdot (\phi_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\phi_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) + \sum_{q=1}^n (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq})$$

$$\nabla \cdot (\phi_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\phi_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) \quad (2-27)$$



Gambar 2.18 *Multiphase flow*  
Sumber : ANSYS Inc. (2010)

*Mixture model* dapat diaplikasikan pada :

- *Flow regime* : *Bubbly, droplet, and slurry flows*
- *Volume loading* : *Dilute to moderately dense*
- *Particulate Loading* : *Low to moderate*
- *Stokes Number* :  $St \ll 1$

Contoh aplikasi *mixture model* :

- *Hydrocyclones*
- *Bubble column reactors*
- *Solid suspensions*
- *Gas sparging*

## 2.7 Hipotesa

Fluida dasar berupa air memiliki konduktivitas termal yang rendah. Dengan penambahan partikel logam yang memiliki konduktivitas termal tinggi diharapkan dapat merubah karakteristik termal dari fluida. Kombinasi partikel CNT dengan partikel oksida logam seperti  $TiO_2$  dan  $ZnO$ , akan meningkatkan konduktivitas termal nanofluida lebih optimal sehingga akan meningkatkan performa perpindahan kalor secara signifikan.