

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Perkembangan nanoteknologi telah menciptakan suatu kelas fluida baru dan agak khusus, disebut nanofluida, yang muncul sebagai fluida yang memiliki potensi besar untuk aplikasi pendinginan. Dari penelitian-penelitian sebelumnya, telah dibuktikan bahwa karakteristik termal yang terbentuk secara signifikan lebih tinggi dibandingkan dengan fluida dasarnya. Seperti dilakukan oleh Choi (1995) yang mencampurkan nanopartikel CuO dan Al_2O_3 dengan fluida cair diantaranya air dan *ethylene glycole*. Dari hasil penelitian diperoleh peningkatan perpindahan kalor konduksinya sebesar 20%. Lalu Eastman, *et.al* (1997) dari hasil penelitiannya diperoleh peningkatan sebesar 40% pada konduktivitasnya termal hanya dengan menambahkan 0,3% partikel Cu pada *ethylene glycole*. Penelitian pengukuran konduktivitas termal dari nanofluida juga dilakukan oleh Lee, *et.al* (1999) dengan menggunakan metode *hot wire* dihasilkan peningkatan konduktivitas termal nanofluida sebesar 1%-10% dengan penambahan 1%-4% volume partikel CuO dan Al_2O_3 dari volume campuran. Das, *et.al* (2003) menyatakan melalui penelitiannya bahwa nanofluida dengan campuran partikel Al_2O_3 memiliki konduktivitas termal 20% lebih tinggi dibandingkan hanya menggunakan fluida dasar saja. Ini juga diprediksikan oleh Putra dan diperkuat dengan penelitian lanjutannya yang menunjukkan peningkatan koefisien perpindahan kalor sebesar 6%-8% pada prosentase volume 1%-4% dengan kisaran temperatur 40°C-60°C.

Permana (2008), menggunakan nanofluida (Al_2O_3 -air) sebagai fluida kerja dibandingkan dengan menggunakan air murni pada radiator otomotif yang dipasang pada terowongan angin. Pada penelitian tersebut dilakukan proses perpindahan kalor konveksi paksa dengan fluida kerja air dan nanofluida dan udara sebagai pendinginnya. Dari hasil penelitian diketahui bahwa koefisien perpindahan kalor konveksi nanofluida mengalami peningkatan sebesar 31-48% untuk prosentase volume nanopartikel 1% dan peningkatan sebesar 52-79% untuk prosentase volume nanopartikel 4% dari fluida dasarnya.

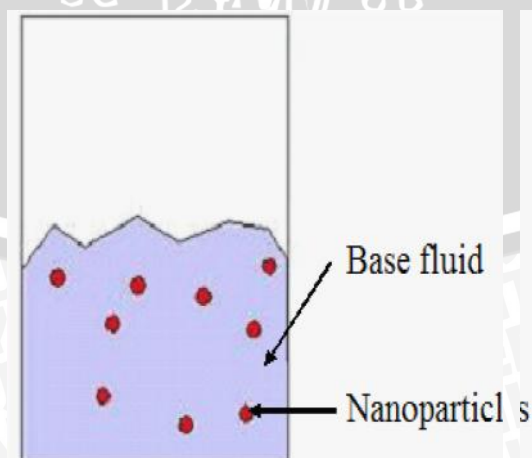
Peyghambarzadeh, *et.al* (2011) meneliti performa pendinginan pada radiator mobil dengan menggunakan nanofluida (Al_2O_3 -air) sebagai fluida kerja dibandingkan menggunakan air murni dan *ethylene glycole*. Radiator yang digunakan terdiri dari 32 pipa vertikal bersirip dengan aliran silang, di mana fluida yang mengalir dalam pipa-pipa dan

udara pendingin dengan kecepatan konstan mengalir tegak lurus di luar pipa. Penelitian ini dilakukan secara eksperimental dengan memvariasikan lima prosentase volume nanopartikel Al_2O_3 antara 0,1–1% dan temperatur inlet radiator 35, 45, dan 50°C . Hasil penelitian yang dilakukan menyimpulkan bahwa nanofluida dengan konsentrasi rendah dapat meningkatkan efisiensi perpindahan kalor di atas 45% dibandingkan menggunakan air murni dan sekitar 40% dibandingkan menggunakan *ethylene glycole* sebagai sebagai fluida kerja.

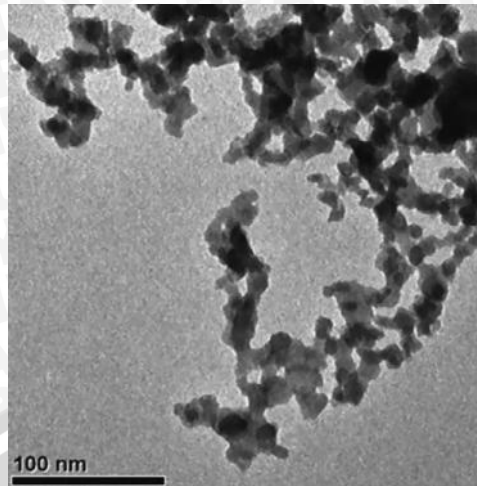
Pada penelitian yang akan dilakukan, penulis menggunakan berbagai variasi temperatur dan kecepatan aliran input radiator dengan prosentase massa nanopartikel Al_2O_3 0,5%, 1%, dan 2% serta kecepatan aliran udara yang konstan kemudian menganalisisnya untuk didapatkan unjuk kerja radiator yang meliputi: koefisien perpindahan kalor konveksi dinyatakan dengan bilangan Nusselt, laju perpindahan kalor, koefisien perpindahan panas menyeluruh, dan *pressure drop*.

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 secara permanen karena adanya efek Brownian pada partikel tersebut. Secara teori campuran ini memiliki konduktivitas termal yang lebih baik daripada fluida dasar pencampurnya, karena partikel padat memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi dari fluida dasar. Fluida dasar yang sering digunakan adalah: air, *ethylene glycole* dan oli. Sedangkan bahan nanopartikel yang digunakan adalah *oxide* (Al_2O_3 , CuO , SiO_2 , ZrO_2), *metal* (Ag, Au, Cu, Fe), *semiconductors* (TiO_2), dan *carbon nanotubes*.



Gambar 2.1 Nanofluida Terdiri dari Fluida Dasar dan Partikel Ukuran Nano
Sumber: Choi, *et.al* (1995)

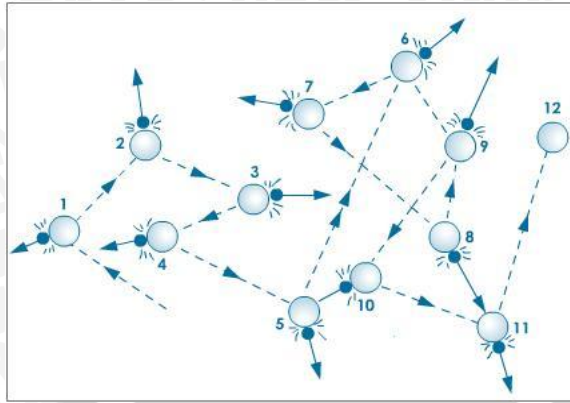


Gambar 2.2 FotoTEM Nanopartikel Alumina (Al_2O_3)
Sumber: Jwo, *et.a* (2010)

H. Masuda, *et.al* (1993) pertama kali meneliti nanofluida dengan partikel Al_2O_3 dan air sebagai fluida dasarnya yang menghasilkan peningkatan konduktivitas termal 30% pada prosentase volume nanopartikel 4,3%. Kemudian Choi, *et.al* (1995) meneliti partikel Al_2O_3 dan CuO dengan fluida dasar *ethylene glycole* dan air. Hasil penelitian mengindikasikan kenaikan konduktivitas termal sebanding dengan kenaikan prosentase volume nanopartikel. Selain itu efek gerak Brown (*Brownion motion*) diperkirakan akan terjadi pada partikel yang berukuran sangat kecil (nanopartikel) di dalam fluida. Hal ini yang menyebabkan pengurangan sedimentasi karena partikel tersebut akan melayang-melayang di dalam fluida. Fluida dasar dan nanopartikel yang sering dipakai dapat dilihat pada tabel 2.1.

2.2.1 Gerak Brownian (*Brownian Motoin*)

Brownian motion adalah gerak acak partikel di dalam fluida yang disebabkan oleh adanya tumbukan dengan molekul fluida. Gerak acak ini pertama kali ditemukan oleh Robert Brown seorang Bottonist pada tahun 1827 yang menyelidiki butiran *pollen* dilarutkan ke dalam fluida, ternyata butiran tersebut tidak mau diam dan terus bergerak secara acak. Gerak inilah yang disebut dengan gerak Brown (*Brownian motion*). Gerak Brown berkurang apabila ukuran partikel semakin besar, hal itu disebabkan karena gaya dorong molekul tidak mampu untuk mendorong partikel. Dan sebaliknya bila ukuran partikel semakin kecil, maka gerak Brown semakin besar.



Gambar 2.3 Gerak Acak Partikel (Gerak Brown) Karena Tumbukan Molekul Fluida
 Sumber: <http://www.tutorvista.com/page/1/>

Rumus koefisien difusi akibat gerak Brown adalah:

$$D_B = \frac{k_B T}{3\pi\mu d_p} \quad (2-1)$$

dengan:

k_B = konstanta Boltzman ($1,3807 \times 10^{-23}$ J/K)

μ = viskositas dinamik (kg/m s)

d_p = diameter partikel (m)

T = temperatur (K)

$$V_p = \frac{2k_B T}{\pi\mu d_p^2} \quad (2-2)$$

Kecepatan nanopartikel (V_p) yang mengambang dalam fluida dasar adalah berbanding terbalik dengan diameter pangkat dua partikel. Semakin kecil diameter partikel maka kecepatan semakin besar. Sebagai contoh nanopartikel diameter 100–10 nm di dalam air pada temperatur kamar kecepatannya berkisar $3,10^{-4}$ m/s – $3,10^{-2}$ m/s.

2.2.2 Konsep Nanofluida

Konsep dan kemunculan nanofluida dimulai sejak Maxwell (1881) meneliti dengan mendispersikan partikel berukuran mili maupun mikro ke dalam fluida. Tetapi partikel tersebut masih terlalu besar untuk terdispersi ke dalam fluida sehingga jika mengalir dalam pipa akan menyumbat alirannya. Sejak saat itu para peneliti terus mengembangkan dan mengatasi keterbatasan ini dengan menggunakan nanopartikel (<100 nm).

Seperti kita ketahui pada temperatur ruang, logam dalam bentuk padat memiliki nilai konduktivitas termal yang lebih tinggi dibandingkan fluida. Sebagai contoh, dapat dilihat pada tabel 2.1. Konduktivitas termal padatan metalik lebih tinggi dari cairan metalik

maupun cairan non-metalik. Konduktivitas termal aluminium pada temperatur ruang adalah sekitar 400 kali lebih besar dari air, 1000 kali lebih besar dari *ethylene glycole*, dan 2000 kali lebih besar dari minyak mesin. Dari keterangan tersebut dapat ditarik kesimpulan bahwa konduktivitas termal fluida yang telah didispersikan partikel metalik maupun non-metalik dalamnya akan lebih baik dibandingkan fluida yang sering digunakan sebagai fluida kerja.

Tabel 2.1 Konduktivitas Termal dari Beberapa Material pada Temperatur 300 K

Jenis Material	Contoh Material	Nilai k (W/mK)
Padatan Metalik	Perak	429
	Tembaga	401
	Aluminium	237
Padatan Non-Metalik	Intan	3300
	<i>Carbon Nanotube</i>	3000
	Silikon	148
	Alumina (Al_2O_3)	40
Cairan Metalik	Sodium pada 644 K	72.3
Cairan Non-Metalik	Air	0.613
	<i>Ethylene Glycole</i>	0.253
	Minyak Mesin	0.145

Sumber: Das (2007:9)

2.2.3 Perkembangan Nanofluida

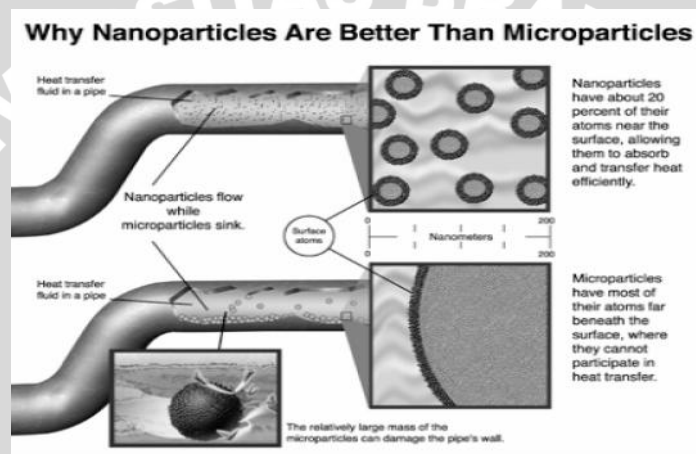
Perkembangan nanoteknologi dewasa ini telah mengarah pada kelas fluida baru dan agak khusus yang disebut nanofluida, yang memiliki potensi besar untuk aplikasi pada alat-alat perpindahan kalor. Istilah nanofluida berarti campuran dua fase di mana fase pendispersi biasanya cairan dan fase yang terdispersi terdiri dari nanopartikel padat yang sangat halus berukuran 1-100 nm. Nanopartikel yang didispersikan pada fluida dengan jumlah yang relatif sedikit dan terdispersi secara merata akan meningkatkan *fluid properties* dari fluida dasar yang digunakan.

Choi, *et.al* (1995) merupakan orang yang pertama kali menggunakan istilah nanofluida yang menggunakan fluida cair dan nanopartikel tersuspensi di dalamnya. Setelah Choi memperkenalkan nanofluida, banyak ilmuwan meneliti dan mengembangkan potensi yang dimiliki nanofluida ini. Perkembangan yang dilakukan bukan hanya dengan

meneliti sifat-sifat nanofluida tetapi juga mengembangkan peralatan yang dapat menggunakan nanofluida sebagai fluida kerja atau dapat disebut sebagai *next generation coolant* seperti *smart coolant* untuk computer dan *safe coolant* untuk reaktor nuklir.

Karena ukurannya yang sangat kecil, maka nanopartikel memiliki keistimewaan, yaitu:

- Mampu tersuspensi lebih lama dalam fluida dibanding mikropartikel jika ditambahkan dengan *surfactants* atau *stabilizer*.
- Luas permukaan per unit volum dari nanopartikel sekitar 1000 kali lebih tinggi daripada mikropartikel, artinya pelepasan kalor menjadi lebih cepat karena $A_{\text{nanopartikel}} > A_{\text{mikropartikel}}$



Gambar 2.4 Perbandingan Nanopartikel dengan Mikropartikel
Sumber: Argonne National Laboratory (2005)

Tabel 2.2 Perbandingan Mikropartikel dengan Nanopartikel

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

Sumber: Das (2007:11)

2.2.4 Pembuatan Nanofluida

Argonne National Laboratory (ANL) menjelaskan ada dua teknik pencampuran nanofluida yaitu teknik pertama, nanopartikel dibuat dan dicampurkan ke dalam fluida

dasar secara bersamaan dan teknik kedua, pembuatan nanopartikel dan pencampuran partikel tersebut dilakukan secara terpisah. Akan tetapi kedua teknik tersebut memperoleh hasil yang baik hanya untuk nanopartikel oksida dan tidak untuk partikel nano logam.

Untuk mencari hasil yang lebih baik Das, *et.al* (2003), melakukan pencampuran menggunakan *ultrasonic vibrator* yang menghasilkan nanopartikel dapat terdispersi dengan baik pada campuran. Dalam persiapan nanofluida ini, perlu diperhatikan densitas partikel nano untuk mendapatkan perbandingan campuran yang tepat. Putra, *et.al* (2003) melakukan pencampuran nanopartikel yang terdispersi dengan baik ke dalam fluida dasarnya dengan menggunakan *ultrasonic vibrator*. Karakteristik yang terbentuk tergantung oleh fraksi volume dari partikel yang dicampurkan. Pada penelitian ini, digunakan prosentase volume nanopartikel sebesar 0,5%, 1% dan 2% Al_2O_3 berukuran kurang lebih 20 nm.

Pada penelitian-penelitian sebelumnya digunakan prosentase volume untuk menentukan konsentrasi campuran. Volume partikel ditentukan dengan menggunakan densitas sebenarnya dari nanopartikel dan massanya dengan mengabaikan massa udara yang terperangkap di dalamnya. Pencampuran nanopartikel ke dalam partikel fluida dasar mengakibatkan pembentukan karakteristik baru terhadap fluida yang dihasilkan. Karakteristik yang terbentuk tergantung dari fraksi volume partikel yang dicampurkan.

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.
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.

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

- Oksida keramik (Al_2O_3 , CuO)
- Nitrit keramik (AlN, SiN)
- Karbida keramik (SiC, TiC)
- Logam (Cu, Ag, Au)
- Semikonduktor (TiO_2 , SiC)

- *Carbon Nanotubes*
- Material komposit ($\text{Al}_{70}\text{Cu}_{30}$)

Sedangkan fluida dasar yang digunakan, antara lain:

- Air
- *Ethylene Glycole*
- Minyak dan Pelumas
- *Bio-fluids*

2.2.4.1 Metode Satu Langkah (*Single-Step Method*)

Single-Step Method menggunakan teknik reduksi kimia untuk membuat nanopartikel yang kemudian langsung didispersikan ke fluida dasarnya. Ada beberapa eksperimen yang dilakukan untuk membuat nanofluida dengan *single-step method*, antara lain: Liu, *et.al* (2006) meningkatkan konduktivitas termal air yang dicampur Cu dengan metode reduksi kimia. Nanopartikel tembaga (Cu) dihasilkan dalam air dengan mereduksi *copper acetate*. Ion Cu^{2+} direduksi menjadi atom tembaga (Cu). Dari atom tembaga terjadi presipitasi membentuk nanopartikel tembaga. *Copper acetate* [$\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$] digunakan sebagai bahan baku yang direndam dalam (fluida dasar) *deionized water*. Larutan diaduk pada temperatur 55°C dengan *nitrogen hydrazine* (N_2H_4) sebagai bahan produksi. Jumlah larutan *hydrazine* ditambah dengan tetap diaduk rata. Larutan didinginkan pada suhu 0°C dan dibiarkan mengendap, kemudian dicuci dengan *deionized water* untuk membersihkan kotoran. Fraksi volum nanopartikel Cu yang dihasilkan dalam larutan dibawah 0,2% volume. Zhu, *et.al* (2004) juga mereduksi $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ dengan $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dalam *ethylene glycole* dengan iradiasi gelombang mikro. Dengan metode ini dapat menghasilkan nanofluida yang stabil dan tidak mengendap. Hasilnya juga menunjukkan bahwa penambahan $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ dan adanya iradiasi gelombang mikro sangat mempengaruhi laju reaksi dan *properties* dari nanopartikel Cu.

2.2.4.2 Metode Dua Langkah (*Two-Step Method*)

Two-Step Method banyak dilakukan dalam sintesa nanofluida dengan menggunakan *nanopowder* yang banyak diproduksi industri secara komersil. Dengan metode ini, nanopartikel langsung dilarutkan dalam fluida dasar. Biasanya peralatan *ultrasonic* digunakan mendispersikan partikel untuk mengurangi penggumpalan.

Selain Das, *et.al* (2003) dan Putra, *et.al* (2003) yang telah diuraikan sebelumnya, beberapa peneliti lain juga menggunakan metode ini antara lain: Murshed, *et.al* (2005)

menggunakan *ultrasonic vibrator* untuk membuat campuran dengan fraksi volum yang berbeda dari nanopartikel TiO_2 ke dalam fluida dasar (*deionized water*) selama 8-10 jam. Penelitian ini menggunakan *surfactant Acid* dan *centyltrimethyl ammonium bromide* (CTAB) untuk membuat larutan yang stabil dan terdispersi dengan baik tanpa mengganggu sifat termofisika dan sifat perpindahan panas karena *surfactant* yang dipakai sangat kecil (konsentrasi volumenya 0,01-0,02%).

Xuan, *et.al* (2003) juga menggunakan teknik yang sama untuk menyiapkan nanofluida. Dengan metode ini, nanofluida dihasilkan dengan mencampur langsung bubuk nanopartikel ke dalam fluida dasarnya selama 10 jam dengan menggunakan *ultrasonic vibrator*. Larutan tersebut mengandung 2-5% volume nanopartikel dengan fluida dasar air dan minyak.

Hong, *et.al* (2005) menggunakan bubuk Fe *nanocrystalline* yang disintesa dengan proses kondensasi gas dengan besi *carbonyl* (FeCO_5) sebagai pelarut dalam aliran helium atmosfer. Nanofluida disiapkan dengan *two-step method* untuk mendispersikan nanopartikel dalam *ethylene glycole*. Untuk membuat cairan tersebut benar-benar larut, digunakan alat *ultrasonic cell disrupter* selama 50 menit yang memperoleh hasil paling baik pada 0,55% konsentrasi volume nanopartikel. Kondensasi gas memiliki kelebihan dibandingkan dengan teknik yang lain karena partikel dapat dibuat dengan keadaan yang lebih bersih dan permukaannya dapat dihindari dari pelapisan yang tidak dikehendaki. Namun, partikel yang diproduksi dengan teknik ini sering terjadi penggumpalan. Tetapi penggumpalan ini dapat dipecahkan menjadi kelompok yang lebih kecil dengan memberikan energi dalam jumlah yang kecil.

2.1.5 Perpindahan Kalor Konveksi Nanofluida

Banyak penelitian yang telah membahas tentang konduktivitas termal pada nanofluida tetapi untuk penelitian perpindahan kalor konveksi ternyata masih sedikit dan sampai sekarang masih berlanjut. Nandy, *et.al* (2003) membahas tentang konveksi bebas pada nanofluida dalam silinder horizontal yang dipanaskan pada salah satu ujung dan ujung lainnya didinginkan. Hasil yang diperoleh menunjukkan karakter fluida yang berbeda dengan fluida pada umumnya. Dalam proses perpindahan kalor, pendidihan nanofluida juga diteliti seperti yang dilakukan Das, *et.al* (2003) pada proses *pool boiling* dalam nanofluida Al_2O_3 /air dan mengindikasikan bahwa nanopartikel mempengaruhi karakteristik proses pendidihan nanofluida. Sementara Xuan dan Quang Li (2003) juga meneliti perpindahan kalor konveksi dan karakteristik aliran dari nanofluida di dalam

tabung. Peningkatan koefisien perpindahan kalor konveksi nanofuida seiring dengan laju aliran dan fraksi volume nanopartikel, sementara koefisien perpindahan kalornya lebih besar dari fluida dasarnya (air) pada laju aliran yang sama.

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

Pada nanofluida terjadi aliran partikulat (*particulat flow*) di dalam fluida dengan partikel padat. Nanopartikel sebagai partikel padat dalam nanofluida merupakan aliran partikulat sehingga akan dipengaruhi oleh karakteristik-karakteristik aliran partikulat seperti:

- *Thermoporesis*, suatu partikel padat yang tersuspensikan dalam fluida akan mengalami gaya yang arahnya berlawanan dengan gradien kenaikan tempertur. Beberapa studi penelitiannya dilakukan oleh Talbot, *et.al* (1980) dan Yamamoto, *et.al* (1998). Berikut adalah rumus gaya *thermoporesis* pada suatu partikel:

$$F_T = -D_T \frac{1}{n_{p,T}} \frac{\delta y}{\delta x} \quad (2-3)$$

di mana:

$$D_T = \frac{6\pi\mu^2 C_s (K_r + 2.18K_r)}{\rho(1+3x1.14K_r)(1+2K_r+4.36K_r)} \quad (2-4)$$

D_T = koefisien difusi termoforik

K_r = rasio antara konduktivitas termal fluida dengan partikel

T = temperature ($^\circ\text{C}$)

m = massa partikel (kg)

C_s = 1.17

= massa jenis partikel (kg/m^3)

μ = viskositas fluida ($\text{kg}/\text{m.s}$)

Tetapi rumus di atas hanya berlaku berdasarkan suspensi partikel padat dalam gas ideal, tentunya perlu modifikasi bila digunakan dalam suspensi partikel padat dalam fluida cair seperti nanofluida.

- *Shear Lift Force* adalah gaya angkat partikel yang diakibatkan adanya gaya geser pada suspensinya.

$$F = \frac{2Kv^{1/2}\rho d_{ij}}{\rho_p d_p (d_{kl} d_{kl})^{1/4}} (v - v_p) \quad (2-5)$$

di mana, $K=2.594$ dan d_{ij} adalah *deformation tensor* yang disebut juga *Saffman's Lift Force*

- Gerak Brownian terkait erat dengan efek temperatur pada konduktivitas termal dan diyakini bahwa konveksi yang terjadi akibat gerak Brownian yang dialami nanopartikel adalah alasan utama mengapa konduktivitas termal nanofluida mengalami peningkatan.
- Efek Soret dan Dufour, efek ini menjelaskan bahwa bila suatu campuran (*mixture*) diberikan suatu gradien temperatur, maka komponen-komponen dari campuran tersebut akan terpisah dan menghasilkan gradien konsentrasi yang lajunya sebanding dengan gradien temperatur.

2.1.5.1 Konveksi Alamiyah

Dalam konveksi alamiyah, gerak perpindahan fluida yang terjadi karena adanya perbedaan kerapatan yang disebabkan oleh adanya gradien temperatur. Koefisien perpindahan panas konveksi alamiyah dinyatakan dengan bilangan Nusselt (Nu), sebagai fungsi dari bilangan Rayleigh (Ra), dan perkalian antara bilangan Grashof (Gr) dengan bilangan Prantl (Pr).

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf} l}{k_{nf}} \quad (2-6)$$

dan

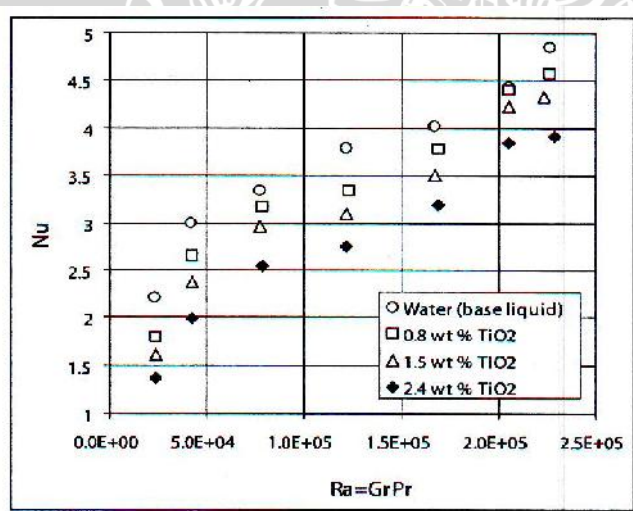
$$Ra_{nf} = Gr \cdot Pr = \frac{g \beta \Delta T l^3}{\nu_{nf} \alpha_{nf}} \quad (2-7)$$

Dimana S adalah koefisien muai volume, τ adalah difusitas termal, k adalah konduktivitas termal, ν adalah viskositas kinematik, l adalah panjang, h adalah koefisien

perpindahan panas konveksi dan indeks nf menunjukkan nanofluida. Difusitas panas nanofluida (Γ_{nf}) adalah:

$$\alpha_{nf} = \frac{k_{nf}}{(\rho.Cp)_{nf}} = \frac{k_{nf}}{(1-\phi)(\rho.Cp)_b + (\phi.Cp)_p} \quad (2-8)$$

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, percobaan konveksi alamiah telah dilakukan oleh Putra, *et.al* (2003) dan Wen dan Ding (2005). Putra, *et.al* (2003) menggunakan partikel Al_2O_3 dan CuO dengan fluida dasar air pada silinder horizontal. Hasilnya adalah koefisien perpindahan panas pada bilangan Rayleigh 5×10^7 , turun sampai 300 % untuk CuO dan 150 % Al_2O_3 pada prosentase berat nanopartikel 4%. Penurunan tersebut disebabkan oleh densitas dan konsentrasi nanopartikel meningkat. Jika ukuran partikel semakin kecil perpindahan panas konveksi kurang baik, sebab peningkatan densitas nanofluid sebanding dengan penurunan ukuran partikel. Begitu juga Wen dan Ding (2005) melakukan percobaan pada partikel TiO_2 dengan fluida dasar air pada dua piringan horizontal bahan aluminium diameter 240 mm dan tebal 10 mm. Kesimpulan penelitian ini sama dengan yang diperoleh Putra *et.al* (2003), di mana koefisien perpindahan panas nanofluida lebih rendah dibandingkan koefisien perpindahan panas fluida dasar (air).



Gambar 2.5 Efek dari Bilangan Rayleigh Terhadap Bilangan Nusselt pada Perpindahan Panas Konveksi Alamiah Untuk Nanofluida TiO_2 /Air (Sumber: Ding *et.al*: 2005)

2.1.5.2 Konveksi Paksa

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

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

Namun, Xuan dan Li (2003) menyimpulkan hal yang berbeda, mereka menemukan bahwa dengan kecepatan yang sama pada penelitian Pak dan Cho (1998). *Pumping power* pada kecepatan aliran konstan sebenarnya mengakibatkan kenaikan koefisien perpindahan kalor sebanyak 40%. Mereka menyimpulkan bahwa bila fluida dasarnya di desain dengan baik, maka kenaikan koefisien perpindahan kalor akan tercapai sesuai yang diinginkan. Pada penelitian Pak dan Cho (1998), kenaikan viskositas yang besar menyebabkan turbulensi berkurang dan pada akhirnya mengurangi laju perpindahan panasnya. Xuan dan Li (2003) juga menyimpulkan bahwa penggunaan persamaan Dittus-Boelter dengan modifikasi *thermal properties* nanofluidanya adalah tidak cukup tepat untuk menjelaskan konveksi pada nanofluida. Karena nanofluida tidak dapat dianggap sebagai fluida *single*, dan dalam nanofluida banyak efek-efek spesial yang terjadi seperti gravitasi, gerak Brownian, gaya *drag* pada partikel, dan difusi. Akhirnya mereka mencoba membuat persamaan yang mengkorelasikan perpindahan kalor nanofluida dalam pipa seperti di bawah ini:

Untuk aliran laminar:

$$Nu = 0.4328(1+11.285\varepsilon_p^{0.754} Pe_d^{0.218}) Re^{0.333} Pr^{0.4} \quad (2-9)$$

Untuk aliran turbulen:

$$Nu = 0.0059(1+ 7.6286\varepsilon_p^{0.6886} Pe_d^{0.001}) Re^{0.9238} Pr^{0.4} \quad (2-10)$$

$$Pe_d = \frac{u_p d_p}{\alpha_p} \quad (2-11)$$

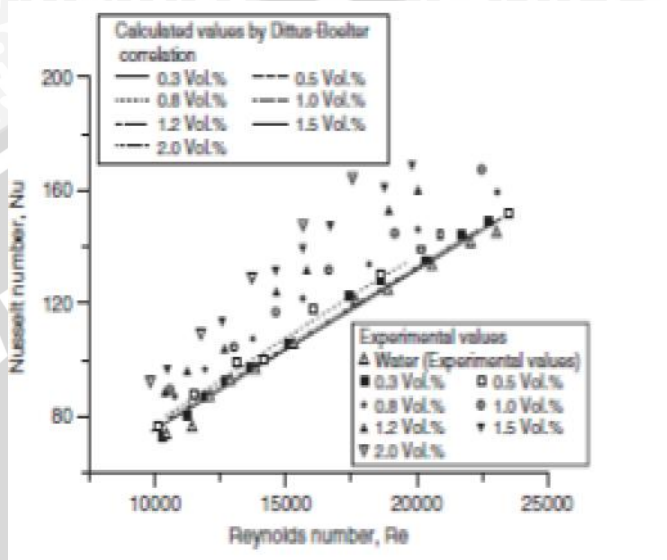
dengan:

Pe_d = bilangan Peclet dari partikel

α_p = difusifitas termal

ε_p = fraksi volum partikel

u_p = kecepatan partikel



Gambar 2.6 Efek dari Bilangan Reynolds Terhadap Bilangan Nusselt Nanofluida pada Perpindahan Panas Konveksi Paksa (Sumber: Xuan dan Li: 2003)

Penelitian lainnya dilakukan oleh Das, *et.al* (2003) yang mengukur viskosita NP- Al_2O_3 dengan fluida dasar air. Hasilnya menunjukkan viskositas adalah besaran yang independen terhadap laju geser (*shear rate*). Penelitian-penelitian yang telah disebutkan di atas menunjukkan bahwa banyak pengaruh variasi viskositas yang terjadi dalam nanofluida.

2.1.5.3 Sifat-sifat Fisik Nanofluida

Diasumsikan bahwa nanopartikel terdispersi dengan baik di dalam fluida dasarnya, dengan prosentase nanopartikel dapat dianggap seragam seluruhnya pada campuran dengan fluida dasarnya, sehingga sifat-sifat fisik dari campuran dapat dihitung dengan menggunakan rumus yang digunakan pada campuran dua fase. Secara umum sifat-sifat fisik nanofluida yaitu konduktivitas termal, densitas, panas jenis, dan viskositas.

1. Konduktivitas Termal Nanofluida (k_{nf})

Konduktivitas Termal Nanofluida Sebagai Fungsi Ukuran Partikel

Dari hasil penelitian sebelumnya oleh Eastman *et.al* (1997), peningkatan konduktivitas termal sekitar 60% untuk nanofluida yang terdiri dari air dengan konsentrasi volume 5% nanopartikel Cu dan sebesar 40% untuk penambahan konsentrasi volume 0,3% nanopartikel Cu dalam *ethylene glycole*. Xuan dan Li (2000) menjelaskan suatu prosedur untuk menyiapkan nanofluida menggunakan peralatan *hot wire* untuk mengukur konduktivitas termal nanofluida dengan nanopartikel bubuk tembaga yang tersuspensi. Pertama mereka menemukan bahwa kenaikan konduktivitas termal adalah linier dan mereka menjadikan penelitian Hamilton-Crosser (1962) sebagai pembandingnya. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa konduktivitas termal menggunakan air dan *ethylene glycole* jauh lebih besar dari yang sudah diperkirakan oleh Hamilton-Crosser. Kesimpulan dari eksperimen ini sangat jauh berbeda untuk nanofluida Al_2O_3 . Sedangkan konduktivitas termal Al_2O_3 dan CuO tidak jauh berbeda dan rata-rata ukuran partikel Al_2O_3 sebesar 38 nm dan CuO sebesar 24 nm. Akhirnya kesimpulan yang diambil mengarah pada perbedaan ukuran nanopartikel.

Teori klasik tentang konduktivitas termal fluida dengan partikel padat yang tersuspensi di dalamnya berasal dari Maxwell (1881), yang mengasumsikan bentuk partikel homogen dan bulat. Teori ini kemudian dimodifikasi untuk partikel tidak bulat oleh R.L. Hamilton dan O.K. Crosser (1962) untuk rasio konduktivitas termal material padat terhadap air lebih dari 100. Persamaan tersebut dinyatakan dalam bentuk rumus, yaitu:

$$k_{eff} = k_o \frac{k_p + (n-1)k_o - (n-1)\varepsilon(k_o - k_p)}{k_p + (n-1)k_o + \varepsilon(k_o + k_p)} \quad (2-12)$$

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

$$n = \frac{3}{\psi} \quad (2-13)$$

di mana ψ adalah kebulatan dari partikel.

$\psi = 1$; bila partikel berbentuk bola

$\psi = 0,5$; bila partikel berbentuk silinder

Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa konduktivitas termal nanofluida dengan fluida dasar air dan *ethylene glycole* jauh lebih besar daripada yang sudah diperkirakan oleh Hamilton-Crosser. Kemudian dikonfirmasi kembali oleh Wasp (1977) sebagai

ekspresi alternatif untuk menghitung konduktivitas termal efektif campuran padat-cair.

Persamaan tersebut ditulis sebagai berikut:

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k_p + 2k_f - 2\phi(k_f - k_p)}{k_p + 2k_f + \phi(k_f - k_p)} \quad (2-14)$$

Dengan fraksi volum didefinisikan sebagai:

$$= \frac{v_p}{v_f + v_p} = m \frac{\pi}{6} d^3 \quad (2-15)$$

Dengan m adalah jumlah partikel perunit volume dan d merupakan diameter rata-rata partikel.

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

$$\frac{k_{eff}}{k_f} = \frac{k + 2 - 2\phi(1 - k)}{k + 2k + \phi(1 - k)} \quad (2-16)$$

$$k = \frac{k_p}{k_f} \quad (2-17)$$

Dengan k adalah ratio perbandingan antara konduktivitas termal partikel padat terhadap konduktivitas termal fluida dasarnya.

Berdasarkan penelitian Pak dan Cho (1998), konduktivitas termal dapat dihitung untuk kebulatan partikel $r=1$ dengan menggunakan rumus:

$$k_{nf} = k_{bf}(4,97\phi^2 + 2,72\phi + 1) \quad (2-18)$$

Dengan k_{nf} adalah konduktivitas termal nanofluida, k_{bf} adalah konduktivitas termal fluida dasar, dan ϕ adalah prosentase nanopartikel.

Konduktivitas Termal Nanofluida Sebagai Fungsi Temperatur

Das, *et.al* (2003) melakukan pengukuran difusifitas termal dan konduktivitas termal pada nanofluida dengan partikel CuO dan Al₂O₃ sebagai bahan suspensinya pada fungsi temperatur. Penelitian ini menjadi titik awal yang menunjukkan dengan jelas tentang pernyataan Lee, *et.al* (1998). Mereka menemukan kesamaan karakteristik Al₂O₃ yang dijelaskan oleh Hamilton-Crosser (1962). Karena perbedaan besar partikel antara Al₂O₃ dan CuO menjadi alasan Das, *et.al* (2003) untuk meneliti hubungan temperatur dengan ukuran partikel yang menyebabkan pergerakan partikel di dalam fluida pendispersinya. Cara satu-satunya untuk menegaskan hipotesis ini yaitu dengan menggunakan temperatur yang berbeda antara 21-55°C. Mereka menggunakan teknik

transient temperature oscillation untuk menunjukkan bahwa hasil eksperimen yang dilakukan dengan sama dengan hasil eksperimen Lee, *et.al* (1999).

2. Densitas Nanofluida dan Panas Jenis Nanofluida

Perhitungan densitas (ρ_{nf}) dan panas jenis nanofluida (Cp_{nf}) dihitung atas dasar campuran (*mixture*) dua zat yang berbeda, yaitu:

$$\rho_{nf} = \varphi\rho_p + (1 - \varphi)\rho_{bf} \quad (2-19)$$

$$Cp_{nf} = \frac{\varphi(Cp.\rho)_p + (1-\varphi)(Cp.\rho)_{bf}}{\rho_{nf}} \quad (2-20)$$

Di mana ρ_{bf} adalah densitas fluida dasar, ρ_{nf} adalah densitas nanofluida, Cp_{nf} adalah panas jenis nanofluida, Cp_{bf} adalah panas jenis fluida dasar, p adalah partikel, bf adalah fluida dasar, dan φ adalah prosentase volume nanopartikel.

3. Kekentalan Nanofluida

Kekentalan atau viskositas adalah salah satu sifat dasar fluida, yang diartikan sebagai ketahanan fluida terhadap laju deformasi. Kekentalan fluida didefinisikan sebagai perbandingan antara tegangan geser dengan laju regangan geser. Pak dan Cho (1998) membuat rumus kekentalan nanofluida dari partikel alumina dengan fluida dasar air untuk kebulatan partikel $\varphi = 1$:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(123\varphi^2 + 7,3\varphi + 1) \quad (2-21)$$

Di mana μ_{bf} adalah kekentalan dinamik fluida dasar, μ_{nf} adalah kekentalan dinamik nanofluida dan φ adalah prosentase volume nanopartikel.

Tabel 2.3 Sifat-sifat Fisik Nanopartikel dan Air pada Suhu 300 K

Sifat-sifat fisik	Air	Tembaga (Cu)	Perak (Ag)	Alumina (Al ₂ O ₃)	Titanium Oksida (TiO ₂)
Cp (J/kg K)	4179	385	235	765	686,2
(kg/m ³)	997,1	8933	10500	3970	4250
k (W/m K)	0,613	401	429	40	8,9538

Sumber: Choi, *et.al.*, (1995)

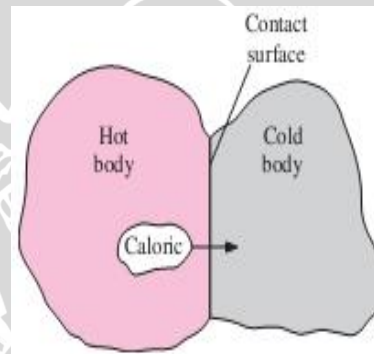
2.3 Perpindahan Panas

Perpindahan kalor dapat didefinisikan sebagai perpindahan energi dari suatu sistem ke sistem yang lainnya sebagai akibat dari perbedaan temperatur. Perpindahan energi ini selalu terjadi dari suatu sistem bersuhu tinggi ke suatu sistem lain yang bersuhu lebih rendah dan akan berhenti setelah kedua sistem mencapai temperatur yang sama. Jika kedua

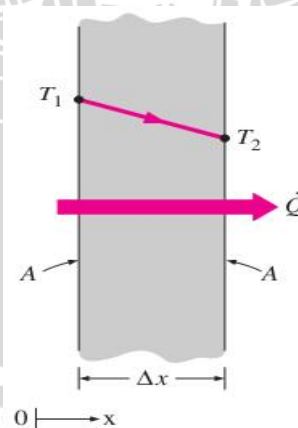
sistem mempunyai temperatur yang sama maka tidak akan terjadi perpindahan panas pada kedua sistem tersebut. Panas dapat berpindah dengan tiga cara yang berbeda, yaitu: konduksi, konveksi, dan radiasi. Pada *heat exchanger*, perpindahan kalor terjadi secara konduksi dan konveksi.

2.3.1 Konduksi

Perpindahan kalor secara konduksi merupakan transfer energi dari partikel yang memiliki energi lebih besar menuju partikel yang memiliki energi lebih kecil akibat adanya interaksi antara kedua partikel yang berdekatan. Konduksi dapat terjadi dalam zat padat, cair, maupun gas. Pada perantara cair dan gas, konduksi terjadi karena adanya molekul yang bertumbukan dan berdifusi dengan gerakan acak. Pada perantara zat padat, konduksi terjadi karena adanya kombinasi dari getaran molekul dalam kisi dan transfer energi melalui elektron bebas.



Gambar 2.7 Perpindahan Kalor secara Konduksi
Sumber: Cengel (2003:13)



Gambar 2.8 Perpindahan Kalor secara Konduksi Melalui Dinding
Sumber: Cengel (2003:13)

Laju perpindahan kalor secara konduksi melalui medium padat dipengaruhi oleh bentuk geometri dari medium, diantaranya adalah ketebalan, jenis material dari medium, dan juga perbedaan temperatur melewati medium perantara. Pada gambar 2.8 dapat

diketahui medium perantara memiliki ketebalan dari dinding sebesar $x=L$ dan luas penampang dinding medium adalah A dan perbedaan temperatur melewati dinding adalah $T = T_2 - T_1$. Laju perpindahan panas Q melalui dinding sebanyak dua kali ketika terdapat perbedaan temperatur, sehingga dapat disimpulkan laju perpindahan kalor secara konduksi melalui dinding sebanding dengan perbedaan temperatur dinding medium dan luas perpindahan panas, tetapi berbanding terbalik dengan tebal dari dinding medium. Sehingga dapat dirumuskan:

$$Q_{\text{cond}} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{Watt}) \quad (2-22)$$

dengan:

Q_{cond} = jumlah kalor yang dipindahkan secara konduksi (Watt).

k = konduktifitas termal bahan (Watt/m°C).

A = luas penampang panas dimana panas mengalir dengan cara konduksi dan harus diukur tegak lurus terhadap arah aliran panas (m²).

x = tebal medium perantara (m).

T = gradien temperatur pada penampang tersebut (°C).

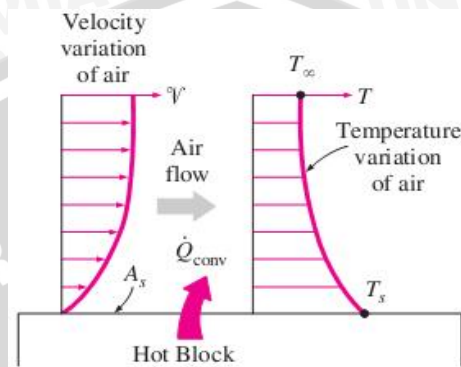
Tanda (-) menunjukkan bahwa aliran kalor secara konduksi terjadi ke arah gradien temperatur yang menurun. Konduktifitas termal merupakan kemampuan suatu bahan yang berupa medium perantara dalam menghantarkan panas tiap satuan panjang (tebal) dan tiap terjadi perbedaan temperatur. Semakin tinggi konduktivitas termal dari suatu material, maka semakin baik pula material tersebut dalam menghantarkan kalor. Sebaliknya semakin rendah konduktivitas termal dari suatu material, maka semakin buruk pula material tersebut dalam menghantarkan kalor.

2.3.2 Konveksi

Perpindahan kalor secara konveksi merupakan transfer energi antara permukaan benda padat yang berdekatan dengan fluida sehingga terjadi kombinasi antara konduksi dengan gerakan dari fluida. Mekanisme perpindahan kalor konveksi merupakan proses pencampuran satu bagian fluida dengan bagian fluida yang lain sehingga terjadi proses transfer energi dari fluida tersebut.

Perpindahan energi dengan cara konveksi dari suatu permukaan yang suhunya di atas suhu fluida sekitarnya berlangsung dengan beberapa tahap. Pertama, panas akan mengalir dengan cara konduksi dari permukaan ke partikel-partikel fluida yang berbatasan. Energi yang berpindah dengan cara demikian akan menaikkan suhu dan energi dalam partikel-

partikel fluida ini. Kemudian partikel-partikel fluida tersebut akan bergerak ke daerah yang bersuhu lebih rendah di dalam fluida dimana akan bercampur dengan memindahkan sebagian energinya kepada partikel-partikel fluida lainnya. Dalam hal ini alirannya adalah aliran fluida maupun energi. Energi sebenarnya disimpan di dalam partikel-partikel fluida dan terbawa oleh gerakan massa partikel-partikel tersebut. Apabila diilustrikan, proses perpindahan panas secara konveksi dapat diilustrasikan pada gambar berikut.



Gambar 2.9 Perpindahan Panas secara Konveksi
Sumber: Cengel (2003:26)

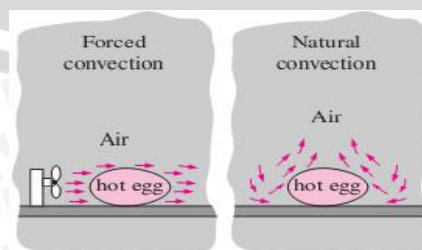
Secara umum, perpindahan panas konveksi dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu:

1. Konveksi Bebas (*Free Convection*)

Gerakan perpindahan fluida pada konveksi bebas terjadi karena adanya perbedaan kerapatan yang disebabkan oleh adanya gradient temperature. Proses ini terjadi secara alamiah sehingga dapat disebut konveksi alamiah (natural convection).

2. Konveksi secara paksa (*Force Convection*)

Pada konveksi paksa fluida dipaksa bergerak oleh adanya gaya atau energi dari suatu peralatan, misalnya pompa dan *blower*. Pada penerapannya di industri, proses ini lebih sering digunakan daripada konveksi alamiah karena mempunyai transfer energi kalor yang lebih besar tetapi dibutuhkan energi tambahan untuk menggerakkan sudu pada pompa maupun *blower*.



Gambar 2.10 Konveksi Paksa dan Konveksi Natural
Sumber: Cengel (2003:26)

Untuk menghitung besar laju perpindahan kalor konveksi dapat menggunakan rumus:

$$Q_{\text{conv}} = hc A(T_s - T_f) \quad (2-23)$$

dengan:

Q_{conv} = laju perpindahan kalor konveksi (Watt)

hc = koefisien perpindahan kalor konveksi (Watt/m²K)

A = luas permukaan panas (m²)

T_s = suhu permukaan (°C)

T_f = suhu fluida (°C)

Koefisien perpindahan kalor konveksi bukan merupakan properti dari fluida. Melainkan beberapa parameter yang tergantung dari semua variabel yang menyebabkan konveksi seperti bentuk permukaan, gerakan fluida, sifat-sifat fisik fluida (viskositas, konduktifitas termal, densitas, dan kalor jenis) dan besarnya kecepatan fluida. Dengan menggunakan viskositas fluida yang tinggi mampu meningkatkan laju perpindahan kalor karena dengan semakin tinggi viskositas yang dimiliki fluida kerja maka kalor sensibel yang dimiliki fluida tersebut juga akan semakin tinggi sehingga penyerapan kalor akan lebih baik.

2.3.2.1 Bilangan Prandtl

Perbandingan antara viskositas kinematik fluida dan difusivitas termal dapat dideskripsikan oleh parameter tak berdimensi yaitu bilangan Prandtl. Viskositas kinematik fluida merupakan informasi tentang laju difusi momentum dalam fluida karena gesekan molekul. Sedangkan difusivitas termal merupakan petunjuk tentang difusi kalor dalam fluida. Jadi, perbandingan antara kedua hal tersebut menunjukkan besaran relatif antara difusi momentum dan difusi kalor dalam fluida.

Kedua laju difusi ini akan menentukan berapa tebal lapisan batas termal pada suatu medan aliran tertentu. Sehingga bilangan Prandtl merupakan penghubung antara medan kecepatan dan medan suhu yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Pr} &= \frac{\text{difusivitas momentum}}{\text{difusivitas termal}} \\ &= \frac{v}{a} \\ &= \frac{\mu/\rho}{k/C_p \rho} \\ &= \frac{\mu C_p}{k} \end{aligned} \quad (2-24)$$

dengan:

a = difusifitas termal fluida (m^2/s)

C_p = kalor spesifik fluida ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)

k = konduktivitas termal fluida ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$)

μ = viskositas dinamik fluida ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$)

= viskositas kinematik fluida (m^2/s)

2.3.2.2 Bilangan Reynolds

Fluida yang mengalir memiliki suatu pola aliran. Pola aliran tersebut adalah pola laminar yang bergerak secara teratur dan pola turbulen yang bergerak tidak teratur (acak). Proses perubahan dari aliran laminar ke aliran turbulen dipengaruhi oleh geometri, kekasaran, kecepatan, temperatur permukaan, dan tipe fluida yang mengalir.

Untuk menentukan jenis aliran maupun tingkat turbulensinya, dapat dilihat dari besarnya perbandingan antara gaya inersia (*inertia force*) dengan gaya viskos (*viscous force*) pada fluida. Perbandingan ini disebut dengan bilangan Reynolds yang juga merupakan parameter tanpa dimensi, di mana untuk aliran eksternal dapat dituliskan sebagai berikut :

$$Re = \frac{\text{gaya inersia}}{\text{gaya viskos}} \quad (2-25)$$

$$= \frac{\rho V^2 / D}{\mu V / D^2}$$

$$= \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$= \frac{\rho V D}{\nu}$$

dengan:

V = kecepatan aliran bebas (m/s)

D = panjang karakteristik dari geometris (m)

ν = viskositas kinematik fluida (m^2/s)

Bilangan Reynolds aliran menjadi turbulen disebut dengan bilangan Reynolds kritis. Besarnya bilangan Reynolds kritis berbeda tergantung pada bentuk geometri aliran. Berdasarkan kebanyakan kondisi percobaan, aliran dalam pipa merupakan aliran laminar pada $Re < 2300$, turbulen pada $Re > 10000$, dan transisi pada $2300 < Re < 10000$.

Pada bilangan Reynolds yang besar, gaya inersia jauh lebih besar dibandingkan dengan gaya viskos-nya, sehingga gaya viskos ini tidak mampu menahan gerakan acak dan fluktuasi aliran yang cepat, dengan demikian terjadi aliran turbulen. Sedangkan pada

bilangan Reynolds rendah, gaya viskos mampu menahan fluktuasi aliran sehingga tetap terjaga dalam bentuk berlapis-lapis pada arahnya masing-masing atau laminar.

2.3.2.3 Bilangan Nusselt

Perpindahan panas melalui lapisan fluida akan terjadi secara konveksi ketika lapisan fluida tersebut bergerak dan akan terjadi secara konduksi ketika lapisan fluida tidak bergerak. Bilangan Nusselt menunjukkan besar perpindahan panas melalui proses konveksi terhadap besar perpindahan panas melalui proses konduksi pada lapisan fluida yang sama (Cengel, 2003:351). Semakin besar angka Nusselt maka perpindahan panas konveksi akan semakin efektif, angka Nusselt (Nu)=1 untuk setiap lapisan fluida menunjukkan bahwa perpindahan panas yang terjadi melewati lapisan tersebut murni melalui proses konduksi. Laju perpindahan panas tiap waktu tiap unit luas pada proses konveksi dan konduksi adalah sebagai berikut:

$$q_{\text{conv}} = h \Delta T \quad (2-26)$$

$$q_{\text{cond}} = k \frac{\Delta T}{D} \quad (2-27)$$

Sehingga rasionya menjadi:

$$\frac{q_{\text{conv}}}{q_{\text{cond}}} = \frac{h \Delta T}{k \frac{\Delta T}{D}} = \frac{hD}{k} = Nu \quad (2-28)$$

Hubungan antara bilangan reynolds dan bilangan nusselt menurut Cengel (1998-357) dituliskan sebagai berikut:

$$Nu = \frac{hL}{k} = C Re_L^m Pr^n \quad (2-29)$$

C , m dan n merupakan konstanta yang diperoleh dari hasil eksperimen dan nilainya berbeda pada tiap-tiap kasus. Dengan demikian berdasarkan dua rumus di atas, tampak bahwa dengan meningkatnya bilangan Reynolds akan memperbesar bilangan Nusselt yang mengakibatkan perpindahan kalor konveksi semakin efektif.

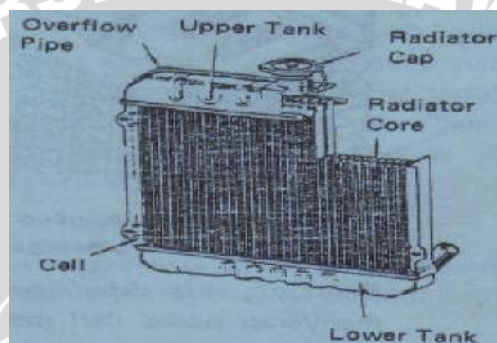
2.4 Heat Exchanger

Alat penukar penukar kalor (*heat exchanger*) adalah alat yang digunakan untuk memindahkan panas antara dua buah fluida yang mempunyai perbedaan temperatur (Cengel, 2003 : 667). Alat penukar kalor diklasifikasikan berdasarkan arah aliran dan tipe konstruksinya. Berdasarkan arah aliran, *heat exchanger* dibedakan menjadi tiga, yaitu: aliran searah (*parallel flow*), aliran berlawanan (*counter flow*), dan aliran bersilang (*cross*

flow). Sedangkan berdasarkan tipe konstruksinya alat penukar panas yang umum digunakan adalah tipe *consentric double tube*, *shell and tube*, *compact heat exchanger*.

2.4.1 Radiator

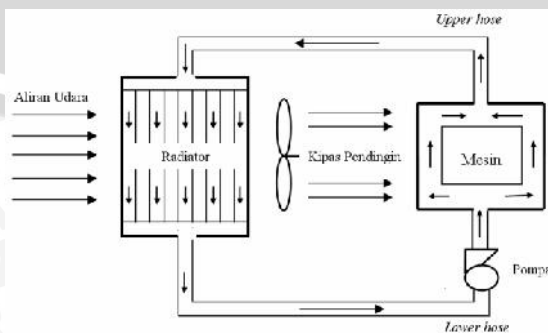
Radiator merupakan alat penukar kalor aliran bersilang (*cross flow*) tipe *compact heat exchanger*. Radiator berfungsi untuk melepas kalor yang dibawa oleh fluida kerja dari mesin ke udara luar melalui dinding radiator. Bagian-bagian radiator antara lain: tangki bagian atas (*upper tank*), tangki bagian bawah (*lower tank*), inti radiator (*radiator core*), sirip (*cell*), kisi-kisi (*tube*), tutup radiator (*radiator cap*), sambungan selang atas (*upper hose*), dan sambungan selang bawah (*lower hose*). Bagian-bagian radiator dapat dilihat pada gambar di bawah ini.



Gambar 2.11 Bagian-bagian Radiator

Sumber: *New Step 2 Training Manual*. Jakarta: PT. Toyota Astra Motor.

Cara kerja radiator adalah panas dari mesin yang diserap oleh fluida kerja dialirkan ke radiator dengan bantuan pompa. Setelah itu, fluida kerja yang telah panas tersebut melewati kisi-kisi radiator kemudian terjadi perpindahan panas secara konduksi melalui dinding radiator. Selanjutnya panas dipindahkan dari dinding radiator ke udara luar dengan bantuan *fan*, sehingga temperaturnya menurun. Fluida kerja yang telah dingin tersebut kemudian dipompakan ke *water jacket* untuk bersirkulasi dan menyerap serta melepas kalor lagi. Sirkulasi sistem pendingin pada mobil dapat dilihat pada gambar berikut:



Gambar 2.12 Sirkulasi Sistem Pendingin pada Mobil

Sumber: *New Step 1 Training Manual*. Jakarta: PT. Toyota Astra Motor.

2.4.2 Laju Perpindahan Panas Radiator

Pada radiator terjadi perpindahan panas secara langsung (*direct contact*) di mana air panas berkontak langsung dengan udara untuk mentransfer kalor dari air ke udara. Perpindahan kalor konveksi paksa terjadi pada radiator karena air didinginkan dengan udara yang dihembuskan oleh bantuan kerja *fan*. Secara umum besarnya perpindahan kalor secara konveksi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h \cdot C_{p_h} \cdot T_{h-o} \quad (2-30)$$

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c \cdot C_{p_c} \cdot T_{c-o} \quad (2-31)$$

dengan:

\dot{m}_h = laju massa aliran fluida dingin (udara) (kg/s)

C_{p_h} = kalor spesifik fluida dingin (udara) (J/kg°C)

T_{h-o} = Selisih suhu antara fluida dingin (udara) masuk dan fluida dingin (udara) keluar radiator (°C).

\dot{m}_c = laju massa aliran fluida panas (air) (kg/s)

C_{p_c} = kalor spesifik fluida panas (air) (J/kg°C)

T_{i-o} = Selisih suhu antara fluida panas (air) masuk dan fluida panas (air) keluar radiator (°C).

Nilai koefisien perpindahan kalor keseluruhan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan di bawah ini. Di mana nilai kalor yang akan digunakan sebagai acuan dalam perhitungan adalah q_h karena menunjukkan kalor yang benar-benar diserap oleh sistem.

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot T_{lm} \quad [W] \quad (2-32)$$

dengan:

U = koefisien perpindahan kalor konveksi [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

A = luas permukaan perpindahan kalor [m^2]

T_{lm} = beda suhu rata-rata [$^\circ C$]

T_{lm} adalah *Logarithmic Mean Temperature Difference* (LMTD) yang merupakan suatu pendekatan yang digunakan untuk menghitung perbedaan temperatur yang terjadi pada sebuah alat penukar kalor. Nilai LMTD dapat ditentukan dari temperatur masuk dan keluar fluida sebagai berikut:

$$T_{lm} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln[(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})]} \quad (2-33)$$

Perlu diketahui bahwa aliran perpindahan kalor yang terjadi didalam radiator merupakan aliran saling menyalang antara fluida satu dengan lainnya, sehingga nilai LMTD harus dikalikan dengan faktor koreksi.

$$T_{lm} = F \cdot T_{lm,CF} \quad (2-34)$$

Faktor koreksi (F) didapatkan dengan memplot nilai P dan R pada grafik faktor koreksi untuk *single pass*, alat penukar kalor aliran menyalang dengan fluida cair tidak tercampur dan fluida gas tercampur.

dimana:

$$P = \frac{(T_{c,o} - T_{c,i})}{(T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (2-35)$$

$$\text{dan } R = \frac{(T_{h,i} - T_{h,o})}{(T_{c,o} - T_{c,i})} \quad (2-36)$$

2.4.3 Penurunan Tekanan (*Pressure Drop*)

Energi yang dimiliki oleh suatu fluida yang mengalir terdiri dari energi dalam dan energi-energi akibat tekanan, kecepatan, dan kedudukan. Persamaan Bernoulli untuk fluida ideal menyatakan tentang hukum kekekalan energi pada fluida berupa energi tekanan, kecepatan, dan elevasi pada fluida di setiap posisi yang ditinjau dari suatu aliran adalah sama besarnya. Persamaan ini dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{P}{\rho} + \frac{v^2}{2} + gz = \text{konstan} \quad (2-37)$$

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} + gz_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} + gz_2 \quad (2-38)$$

Apabila persamaan (2-39) dibagi dengan kecepatan gravitasi (g) maka persamaan tersebut akan menunjukkan energi fluida tiap satuan berat dari fluida (*Head*). Sehingga persamaan tersebut menjadi:

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z = \text{Total Head } (H) = \text{konstan} \quad (2-39)$$

dengan:

P = Tekanan statis fluida [N/m²]

= Kecepatan aliran fluida [m/s]

= Massa jenis fluida [kg/m³]

g = Percepatan gravitasi [m²/s]

z = Elevasi fluida [m]

γ = Berat jenis (.g) [kg/m².s²]

Pada aliran fluida, terdapat *head losses* yang terjadi, diantaranya adalah gesekan antara fluida dengan dinding saluran atau karena adanya belokan pada pipa. *Head losses* adalah energi yang hilang pada fluida ketika fluida mengalir. Besarnya *head losses* tergantung pada bentuk, ukuran, dan kekasaran saluran serta kecepatan dan viskositas fluida. *Head losses* tersebut akan mengakibatkan penurunan tekanan. *Head losses* aliran fluida dibagi menjadi dua, yaitu *major losses* dan *minor losses*.

2.4.4.1 Major Losses

Merupakan kerugian pada aliran fluida yang disebabkan oleh gesekan antara fluida dengan saluran. Besarnya *major losses* dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$h_{mc} = f \frac{L.v^2}{D.2g} \quad (2-40)$$

dengan:

- h_{ma} = Major losses (m)
- f = Koefisien gesekan
- L = Panjang pipa (m)
- v = Kecepatan fluida (m/s)
- D = Diameter pipa (m)
- g = Percepatan gravitasi (m^2/s)

2.4.4.2 Minor Losses

Merupakan kerugian pada aliran fluida yang disebabkan oleh adanya *vortex* oleh komponen atau alat yang terdapat pada saluran tersebut. Adapun yang termasuk alat atau komponen tersebut adalah katup, saringan, perubahan luas penampang, *orifice*, *longitudinal fin* yang dipasang pada saluran pipa dan sebagainya. Besarnya *minor losses* dapat dihitung dengan rumus di bawah ini.

$$h_{mi} = k \frac{v^2}{2g} \quad (2-41)$$

dengan:

- h_{mi} = *Minor losses* (m)
- k = faktor kerugian komponen

Sehingga *head losses* (h) totalnya adalah:

$$h = h_{ma} + h_{mi} \quad (2-42)$$

2.5 Hipotesa

Penambahan nanopartikel ke dalam air murni akan meningkatkan *fluid properties*, semakin besar prosentase nanopartikel maka akan meningkatkan koefisien perpindahan panas menyeluruh, laju perpindahan panas, dan *pressure drop* pada aliran.

