

Kenaikan Koefisien Perpindahan Kalor Kondensasi Film Pada Kondenser Silinder Vertikal Dengan Nanofluida Al_2O_3 – Air sebagai Fluida Pendingin

Nandy Putra, Fred S. Noviar, Hery Wijaya dan R.A. Koestoer

Laboratorium Perpindahan Kalor

Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia Kampus Baru UI Depok

Email:nandyputra@eng.ui.ac.id

Abstrak

Penelitian terhadap nanofluida mulai banyak dilakukan untuk menunjukkan bahwa nanofluida berpotensi untuk menjadi fluida kerja alternative yang memiliki koefisien perpindahan kalor yang lebih baik. Nanofluida adalah campuran antara partikel padat yang memiliki diameter dalam ukuran nanometer dengan fluida dasarnya. Partikel berukuran nanometer tersebut tersuspensi dalam fluida dasar secara permanen yang dikarenakan adanya efek Brownian pada partikel tersebut. Sebelum nanofluida tersebut dapat diaplikasikan untuk keperluan komersil, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk menyempurnakannya. Pada penelitian ini dilakukan pengukuran koefisien perpindahan kalor pada proses kondensasi film pada kondenser vertikal dimana nanofluida Al_2O_3 -Air digunakan sebagai media pendinginnya. Dengan variasi laju aliran pendingin dan konsentrasi volum dari nanofluida, hasil penelitian mengindikasikan koefisien perpindahan kalor kondensasi dengan menggunakan nanofluida sebagai media pendingin mengalami peningkatan 12% - 19% untuk konsentrasi 1% dan peningkatan 23% 33% untuk konsentrasi 4% dari fluida pendingin air.

Kata Kunci : Nanofluida, Kondensasi Film, Koefisien Perpindahan Kalor

Abstract

Research to nanofluida have a lot of conducted to indicate that nanofluida has a great potency for better heat transfer. Nanofluida is mixture between solid particle of nanosize with the based- fluids. Nano particle suspended in based- fluid permanently which is because of existence of Brownian effect. Before nanofluida can be applied in commercial purpose, the furthermore experiment is needed. In this research conducted the measurement of heat transfer coefficient film condensation which used vertical condenser and nanofluids Al_2O_3 -water as cooling fluids. With variation of flow rate of cooling fluid and volume concentration of nanofluid as well, the experimental result shows the enhancement of condensation heat transfer coefficient with nanofluid compared to base fluids : 12-19% for 1% particles concentration and 23-33% for 4% particles concentration.

Keywords : Nanofluids, Film Condensation, Heat Transfer Coefficient

1. Pendahuluan

Kondenser adalah alat penukar kalor yang digunakan untuk menurunkan temperatur fluida dengan disertai adanya perubahan fase fluida dari uap ke cair. Peristiwa ini disebut kondensasi. Teori tentang kondensasi pertama kali dirumuskan oleh Nusselt [1], yang menguraikan peristiwa kondensasi yang terjadi pada plat vertikal dengan suhu

konstan di bawah suhu saturasi pada uap yang berada di sekitar plat. Jika dinding kondenser itu basah oleh zat cair, maka pada permukaan akan terbentuk suatu lapisan film yang tipis, peristiwa ini disebut kondensasi film. Ketebalan film yang terbentuk sangat mempengaruhi kemampuan perpindahan kalor kondensasi, karena lapisan tersebut dapat meningkatkan tahanan termal keseluruhan. Banyak penelitian yang telah dilakukan untuk

mempelajari mekanisme terbentuknya lapisan film dan parameter-parameter yang mempengaruhinya dan banyak peneliti menggunakan pendekatan teori Nusselt untuk melakukan penelitian terhadap pengaruh ketebalan film. Kemudian efek dari konveksi termal pertama kali diteliti oleh Bromley [2] dan juga dilakukan oleh Rohsenow [3], mereka mengusulkan modifikasi terhadap kalor laten yang terjadi pada kondensasi yang dapat digunakan untuk perpindahan kalor pada plat. Lalu Sparrow dan Gregg [4] melakukan penelitian tentang hubungan antara konveksi natural dengan lapisan batas dan kondensasi film laminar. Sementara efektivitas dari kondenser dipengaruhi oleh berbagai macam faktor lainnya diantaranya fluida kerja yang menjadi fluida kerja pendingin.

Ide mencampurkan partikel logam dalam ukuran nanometer ke dalam fluida kerja yang dikenal dengan nanofluida diprediksi dapat meningkatkan kemampuan perpindahan kalor dari fluida dasar selain itu dengan mencampur partikel logam dalam ukuran nano, permasalahan seperti peningkatan jatuh tekan, abrasif, penyumbatan dan sedimentasi dapat dikurangi.

Penelitian mengenai nanofluida pertama kali dilakukan oleh Choi, et.al[5], yang melakukan penelitian mengenai pengukuran termal konduktivitas dari nanofluida Al_2O_3 , CuO dengan ethylene glycol dan Air. Hasil penelitian mengindikasikan kenaikan termal konduktivitas sebanding dengan kenaikan prosentase volum nano partikel yang dicampurkan. Kemudian Das et. al [6] melakukan pengukuran termal konduktivitas nanofluida dengan melihat pengaruh temperatur fluida. Hasilnya diperoleh bahwa termal konduktivitas dari nanofluida meningkat secara signifikan dengan meningkatnya temperatur.

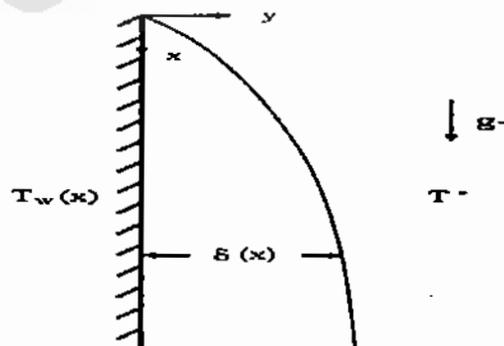
Melihat hasil penelitian sebelumnya dan untuk menguji lebih lanjut kemampuan perpindahan kalor pada nanofluida maka penelitian ini memiliki tujuan untuk mengukur koefisien perpindahan kalor kondensasi pada silinder vertikal. Dalam

penelitian ini digunakan nanofluida Al_2O_3 dengan konsentrasi volume 1 % dan 4 %.

2. Film Kondensasi Pada Silinder Vertikal

Pada proses kondensasi film terjadi lapisan tipis/film dan karena adanya gaya gravitasi akan mengalir ke bawah menutupi permukaan kondenser. Aliran tersebut menimbulkan gradien suhu pada lapisan film dan tentunya terdapat tahanan termal terhadap perpindahan kalor yang terlihat pada gambar 1. Pada permukaan kondenser setelah lapisan film juga terdapat lapisan gas yang menyelimuti kondensat. Gas yang dibawa oleh uap menuju permukaan dan terjadi akumulasi adalah gas yang tidak terkondensasi (nonkondensable gas). Hal ini berpengaruh pada laju perpindahan kalor pada daerah permukaan antara fluida dan uap dikarenakan lapisan gas tersebut juga dapat menimbulkan tahanan termal sendiri. [1]

Apabila diasumsikan aliran yang terjadi pada permukaan kondenser berupa lapisan film berada pada kondisi laminar dan uap yang digunakan adalah uap murni sehingga menghasilkan temperatur yang seragam pada T_{sat} serta tidak adanya beda temperatur maka perpindahan kalor antara lapisan film dan uap hanya terjadi karena kondensasi bukan secara konduksi.



Gambar 1.
Model lapisan film dan gas

Kemudian ketebalan kondensat (film) menurut Rohsenow [3] dapat ditulis :

$$\delta = \left[\frac{4\mu_l k_l (T_s - T_w) x}{\rho_l (\rho_l - \rho_g) g \lambda} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

dimana δ adalah ketebalan film pada jarak x dari puncak plat. Sehingga koefisien perpindahan kalor h_x pada jarak x adalah:

$$h_x = \frac{k_l}{\delta} = \left[\frac{\rho_l (\rho_l - \rho_g) g \lambda k_l^3}{4\mu_l (T_s - T_w) x} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

dan untuk mengetahui koefisien perpindahan kalor rata-rata, maka

$$\bar{h} = \frac{1}{L} \int_0^L h_x dx \quad (3)$$

Hasil dari integrasi persamaan (3) adalah koefisien perpindahan kalor rata-rata. Sehingga persamaan 2 dapat ditulis menjadi

$$\bar{h} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \left[\frac{\rho_l (\rho_l - \rho_g) g \lambda k_l^3}{\mu_l L (T_s - T_w)} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

Persamaan (4) dapat diaplikasikan pada plat vertikal dan silinder dan fluida dengan $Pr > 0.5$ dan $C_p \Delta T / \lambda \leq 1$.

Persamaan ini diperoleh pertama kali oleh *Nusselt* [1]. Efek subcooling dari liquid pada film yang juga diperhitungkan jika diasumsikan profil temperaturnya pada filmnya linier. Maka kalor laten kondensasi pada persamaan (4) harus diganti dengan λ'

$$\lambda' = \lambda + \frac{3}{8} C_{p_l} (T_g - T_w) \quad (5)$$

Lalu *Rohsenow* [3] menunjukkan bahwa kondensasi terjadi sepanjang waktu, maka film akan selalu membentuk profil linear untuk temperaturnya, sehingga ia merekomendasikan untuk menggunakan kalor laten modifikasi dalam bentuk:

$$\lambda' = \lambda + 0.68 C_{p_l} (T_g - T_w) \quad (6)$$

Dalam bentuk non dimensi kemampuan perpindahan kalor dapat ditulis sebagai berikut :

$$Nu = \frac{\bar{h}_l L}{k_l} = \frac{2\sqrt{2}}{3} \left[\frac{\rho_l (\rho_l - \rho_g) g \lambda' L^3}{\mu_l k_l (T_s - T_w)} \right] \dots\dots(7)$$

3. Kondensasi Lapisan Film Turbulen

Pada pipa vertikal, aliran turbulen pada dinding dapat terjadi jika panjang lintasan aliran terlalu panjang. Untuk menentukan bahwa aliran tersebut laminar, transisi atau turbulen, dapat diketahui dengan menghitung angka Reynold aliran tersebut. Pada sistim kondensasi angka Reynold dapat dihitung dengan

$$Re_l = \frac{D_H \rho_l V}{\mu_l} = \frac{4A \rho_l V}{b \mu_l} \quad (8)$$

sedangkan laju aliran ,

$$\dot{m} = \rho_l A V \quad (9)$$

maka bilang Reynold dapat ditulis,

$$Re_l = \frac{4 \dot{m}}{\mu_l b} \quad (10)$$

Dengan,

b = perimeter basah

$b = \pi d$, untuk tabung vertikal

Dalam menghitung angka Reynold, aliran massa dapat dikorelasikan dengan koefisien perpindahan kalor yang terjadi.

$$q = hA(T_s - T_w) = \dot{m} \lambda' \quad (11)$$

sehingga,

$$\dot{m} = \frac{q}{\lambda'} = \frac{hA(T_s - T_w)}{\lambda'} \quad (12)$$

dengan mensubstitusikan pers (12) ke pers (10)

maka diperoleh,

$$Re_l = \frac{4hL(T_s - T_w)}{\lambda' \mu_l} \quad (13)$$

Jika $Re < 1800$, maka aliran film bersifat laminar dan jika > 1800 , maka aliran bersifat turbulen dan bersifat transisi pada bilangan Reynold 1800.

4. Karakteristik Nanofluida

Pada penelitian ini digunakan nanofluida sebagai fluida pendingin pada proses kondensasi. Nanofluida adalah campuran antara partikel solid dengan fluida cair misalkan air, oli dan ethylen glycol. Partikel solid yang dicampur dalam penelitian ini adalah partikel nano Al_2O_3 dengan ukuran 38 nanometer yang dicampur dengan air.

Penelitian-penelitian yang telah dilakukan oleh peneliti sebelumnya menggunakan partikel logam diantaranya Al_2O_3 , CuO . [5,6]. Penelitian tersebut melihat bagaimana peningkatan termal konduktivitas yang terjadi jika menggunakan nanofluida sebagai fluida pendingin daripada menggunakan fluida dasarnya. Dari hasil penelitian tersebut, diperoleh peningkatan termal konduktivitas yang lebih baik. Hal Ini dikarenakan partikel yang tercampur pada fluida dasar meningkatkan luas permukaan dan kapasitas kalor dari fluida, sehingga efektivitas konduktivitas termal fluida meningkat pula. [6,7,8]

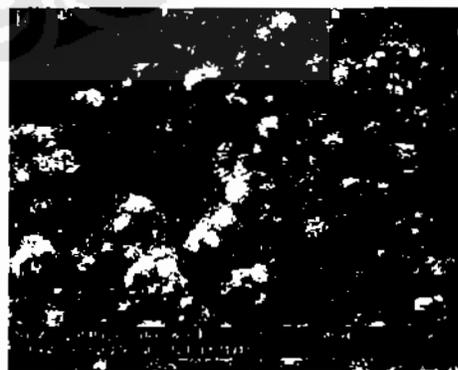
Partikel dalam ukuran nanometer ini menyebabkan meningkatnya interaksi dan tumbukan antar partikel, fluida dan permukaan yang dilaluinya, adanya fluktuasi pencampuran dan turbulensi dari fluida yang meningkat serta gradien temperatur dari fluida yang mengecil. Partikel nano ini mengalami gerak Brownian sehingga ketika fluida dalam keadaan diam, partikel ini terdistribusi merata dengan gaya apung (bouyancy) sehingga tidak terjadi sedimentasi. [6,7,8].

Dalam hal pencampuran nano partikel pada fluida dasar, sangat sedikit literatur yang menjelaskannya. Peneliti-peneliti dari Laboratorium Nasional Argonne, menjelaskan bahwa ada dua teknik pencampuran nanofluida yaitu teknik pertama, nano partikel dibuat dan

dicampurkan ke dalam fluida dasar secara bersamaan dan teknik kedua, pembuatan nano partikel dan pencampuran partikel tersebut dilakukan terpisah. Akan tetapi kedua teknik tersebut memperoleh hasil yang baik hanya untuk partikel nano oksida dan tidak untuk partikel nano logam. [5]

Untuk mencari hasil yang lebih baik *Das et al* [6]. melakukan pecampuran menggunakan ultrasonic vibration yang menghasilkan campuran yang partikel nanonya terdispersi dengan baik pada campuran yang terlihat pada gambar 2. Dalam persiapan nanofluida ini perlu diperhatikan densitas dari partikel nano untuk mendapatkan perbandingan campuran yang tepat

Pada penelitian-penelitian sebelumnya digunakan persentase volum untuk menentukan konsentrasi campuran. Volume partikel ditentukan dengan menggunakan densitas sebenarnya dari partikel nano dan massanya dengan mengabaikan massa udara yang terpertangkap di dalamnya. Pencampuran partikel nano ke dalam fluida dasar mengakibatkan pembentukan karakteristik baru terhadap fluida yang dihasilkan, karakteristik yang terbentuk tergantung dengan fraksi volum dari partikel yang dicampurkan [5].



Gambar 2.
Foto TEM nanofluida Al_2O_3 -Air [5]

Dari hasil penelitian yang dilakukan terhadap nanofluida menunjukkan bahwa fluida tersebut merupakan fluida Newtonian. Untuk hasil pengukuran

terhadap temperatur, menunjukkan bahwa viscositas konsentrasi 4% lebih tinggi daripada 1% dan juga terlihat bahwa semakin tinggi suhu fluida maka semakin rendah viscositasnya. Karakteristik thermal secara jelas diuraikan di Putra 2002 [8].

5. Eksperimental

Pada penelitian ini dibangun suatu alat pengujian kondensasi dengan kondenser silinder vertikal dan penelitian ini dilakukan di Laboratorium Perpindahan Kalor Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia.

Kondensasi unit ini dibangun untuk meneliti fenomena kondensasi film dimana pada permukaan kondenser akan terjadi lapisan film yang menimbulkan tahanan sendiri. Kalor yang diberikan oleh uap selama proses kondensasi dikonduksikan melalui lapisan film menuju dinding dan terus ke fluida pendingin dalam hal ini, selain air juga digunakan nanofluida.

Pada gambar 3 dapat dilihat skema dari alat pengujian yang dibangun. Pada unit tersebut terdapat satu unit kondenser silinder (14) yang dipasang secara vertikal dari bahan tembaga dengan diameter 12.7 mm, tebal 1mm dan panjang 90 mm. Di dalam silinder tersebut mengalir fluida kerja pendingin. Pada bagian dalam kondenser digunakan untuk mengalir fluida sebagai pendingin. Untuk mengukur temperatur dinding silinder maka dipasang satu termokopel pada dinding kondenser sementara dua termokopel lainnya dipasang untuk mengukur temperatur masuk (8) dan keluar fluida (7). Termokopel yang digunakan adalah tipe K

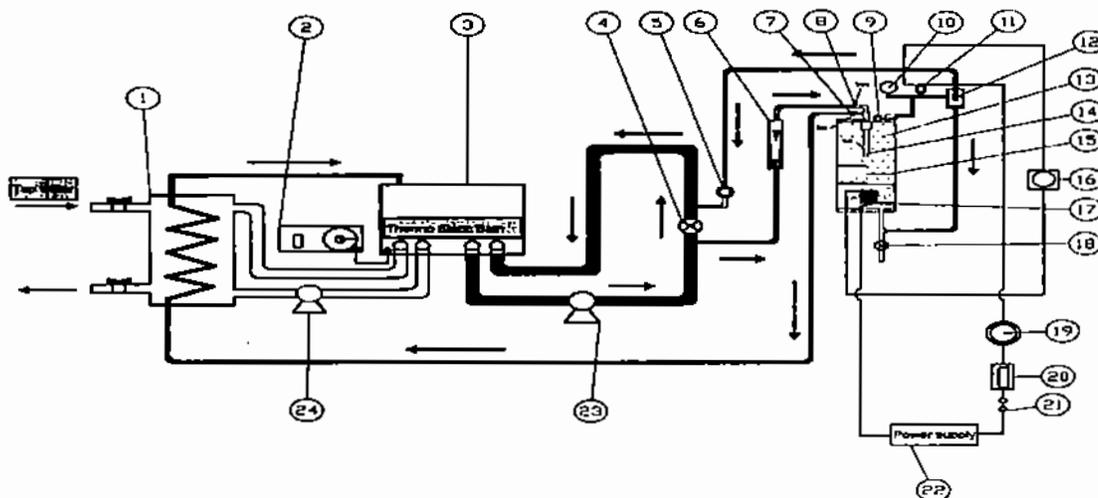
Kondenser tersebut dipasang dalam tabung terbuat dari kaca tebal yang kuat berbentuk silinder dengan penutup

kuningan yang dilapisi nikel dihubungkan dengan seal PTFE, kondenser ini memiliki saluran masuk dan keluar fluida seperti yang terlihat pada gambar 4. Pada bagian bawah tabung dipasang elemen pemanas (17) untuk memanaskan air dalam tabung sehingga terbentuk uap pada steam chamber (13) yang akan terkondensasi pada dinding kondenser.

Aliran fluida pendingin dibuat siklus tertutup sehingga untuk menjamin temperatur fluida pendingin saat masuk ke dalam kondenser dengan temperatur yang konstan maka dalam penelitian ini digunakan termostatic bath (3), yang selain berfungsi sebagai bak penampungan juga digunakan untuk mempertahankan temperatur yang diinginkan dengan unit kontrol (2). Spesifikasi Termostatic bath ini adalah 220 V dan memiliki daya 4kW yang dapat mempertahankan suhu dengan range 5°C-70°C.

Pada Thermostatic bath ini terdapat dua sisi yang dialiri oleh air kran. Pada sisi dalamnya dialiri oleh fluida pendingin untuk kondenser dan sisi lainnya sebagai pendingin atau penyerap panas pada sistim alat ini tergantung proses apa yang dilakukan pada thermostatic bath ini, apakah dipanaskan atau didinginkan. Sebelum dilakukan pengambilan data, dilakukan proses vakum pada tabung agar tidak terbentuk gas yang tidak dapat terkondensasi.

Pada penelitian ini laju aliran juga divariasikan dengan menggunakan flow meter (6) yang dapat diatur debitnya dengan range 1-12 gr/s. Untuk menjaga tekanan konstan dalam steam chamber dan menjaga batas tekanan maksimum pada tabung



Gambar 3.
Skema alat uji

membuka secara otomatis pada tekanan mencapai 20 kN/m dan juga dipasang pressure switch (11) yang akan memutuskan aliran listrik pada pemanas pada tekanan mencapai 10 kN/m yang terbaca pada pengukur tekanan (10), dimana tekanan pada alat ukur sama dengan selisih dari tekanan absolut uap dengan tekanan atmosfer.

Data yang diambil pada eksperimen ini adalah temperatur dinding, fluida pendingin masuk dan keluar serta temperatur saturasi. Data-data tersebut diambil dan di simpan digunakan pressure relief (9) yang akan dengan menggunakan data akuisisi.

6. Teknik Wilson Plot

Teknik Wilson Plot mengolah data hasil eksperimen dengan metode pendekatan dalam penentuan hubungan antara perbedaan temperatur dan fluks kalor pada kedua sisi kondenser dari pengukuran perbedaan temperatur antara dua fluida dan perpindahan panas yang terjadi antara kedua fluida tersebut, seperti yang dilakukan oleh Rose[9] dengan memprediksi koefisien perpindahan kalor dengan korelasi Wilson Plot dan Das, et al[10] melakukan modifikasi terhadap metode ini untuk diterapkan pada tabung horizontal. Persamaan umum perpindahan klaor yang biasa digunakan adalah

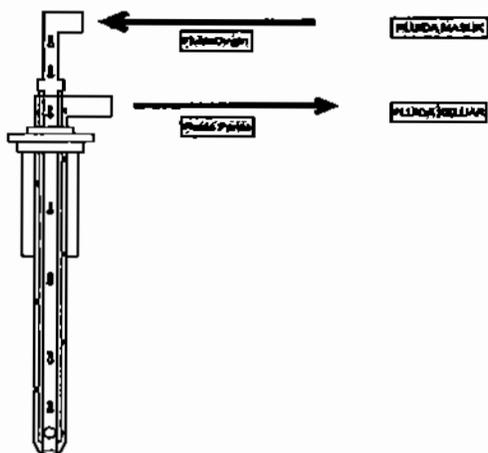
$$q = U.A.LMTD$$

$$U = \frac{\dot{m}C_p(T_o - T_i)}{A_o(LMTD)} \quad (14)$$

dimana;

$$LMTD = \frac{(T_o - T_i)}{\ln \frac{(T_w - T_i)}{(T_w - T_o)}} \quad (15)$$

Terlihat pada gambar 5. distribusi kalor yang terjadi pada silinder. Kalor yang terdistribusi dari pusat silinder ke dinding dan pada lapisan film yang terjadi. Sehingga:



Gambar 4.
Kondenser Vertikal

$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\Delta x}{k_w A_w} + \frac{1}{h_o A_o}} \quad (16)$$

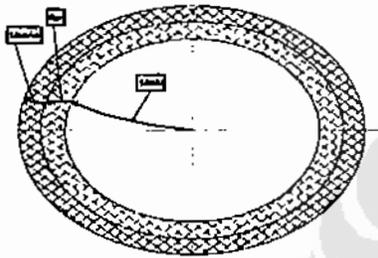
maka,

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{h_i A_i} + R_w + \frac{1}{h_o A_o} \quad (17)$$

Apabila bilangan nusselt dikorelasikan dengan persamaan Dittus Boelter:

$$Nu_L = \frac{h_L \cdot D}{k_L} \quad (18)$$

$$Nu = c \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (19)$$



Gambar 5. Distribusi kalor pada pipa

Gambar 5.

Distribusi kalor pada pipa

maka,

$$\frac{h_i \cdot D}{k} = c \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \quad (20)$$

sehingga,

$$h_i A_i = k \cdot \pi \cdot c \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} \cdot L \quad (21)$$

Pada penelitian ini dilakukan variasi terhadap laju aliran sehingga bilangan Reynold pun berubah-ubah dengan bilangan Prandtl konstan maka persamaan 21 dapat ditulis menjadi

$$h_i A_i = C \cdot Re^{0.8} \quad (22)$$

dengan demikian persamaan (17) dapat ditulis:

$$\frac{1}{UA} = \frac{Re^{-0.8}}{C} + R_w + \frac{1}{h_o A_o} \quad (23)$$

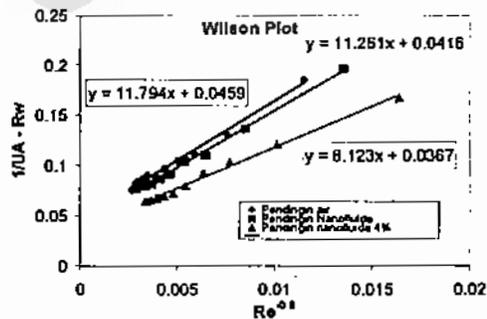
Persamaan (17) dapat dapat dibuat regresinya dengan bentuk persamaan $Y = aX + b$, sehingga dapat ditulis:

$$\frac{1}{UA} - R_w = \frac{Re^{-0.8}}{C} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (24)$$

Lalu dibuat grafik antara $1/UA - R_w$ dengan $Re^{-0.8}$. Sehingga Nilai C dapat ditentukan dengan $1/\text{gradien}$ dan $h_o A_o$ dari grafik yang diperoleh dari Wilson Plot seperti pada gambar 6.

7. Hasil dan Analisa Data

Dari hasil pengukuran kemudian data tersebut diolah dan diplot seperti terlihat pada gambar 6, Dari grafik tersebut terlihat, dengan menggunakan metode Wilson plot diperoleh grafik linier. Sehingga dari grafik tersebut kemudian dapat ditentukan nilai C dan $h_o A_o$ nya. Kemudian dari hasil pengolahan data eksperimen diperoleh data yang dijelaskan dengan grafik seperti pada gambar 7 terlihat hubungan antara fluks kalor terhadap laju aliran pendingin. Dengan peningkatan laju aliran, fluks kalornya akan meningkat secara signifikan dan pada akhirnya akan mendatar. Hal ini disebabkan oleh semakin tebalnya lapisan film yang terbentuk pada permukaan kondenser, yang mengakibatkan timbul tahanan termal tersendiri dalam peristiwa kondensasi.

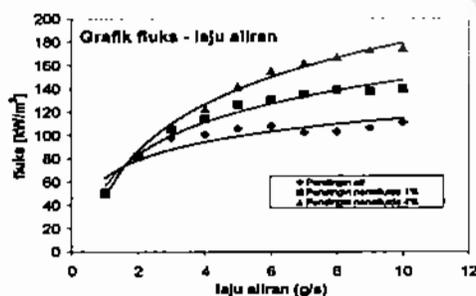


Gambar 6. Wilson plot

Oleh sebab itu terjadi penurunan temperatur dinding kondenser dikarenakan kalor uap telah diserap oleh lapisan film

sebelum sampai pada permukaan dinding kondenser. Pada gambar 7 terlihat bahwa dari ketiga jenis fluida pendingin yang digunakan, terlihat bahwa nanofluida dengan konsentrasi 1% dan 4% menghasilkan fluks kalor yang lebih tinggi dari air. Ini dimungkinkan karena karakteristik termal pada nanofluida lebih baik seperti yang dilakukan *Das, et.al*[6] dan *Putra*[7]. Sementara pada laju aliran pendingin yang rendah efek dari nanopartikel tidak timbul pada nanofluida, hal ini dikarenakan potensi kemungkinan tumbukan yang terjadi antar nano partikel lebih rendah daripada dengan laju aliran yang lebih tinggi.

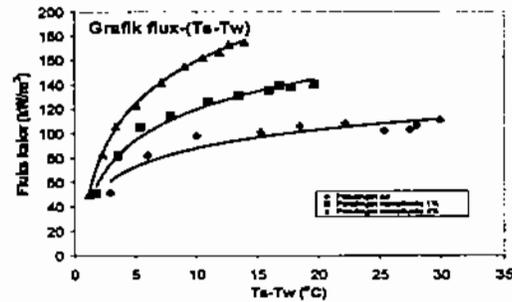
Kemudian pada gambar 8. terlihat hubungan kalor fluks terhadap perbedaan temperatur antara temperatur saturasi dan temperatur dinding kondenser. Pada proses kondensasi dimana fluida pendingin yang digunakan adalah nanofluida terlihat bahwa perbedaan temperatur antara dinding dengan temperatur saturasi lebih kecil dibanding dengan air. Hal ini jelas disebabkan oleh ketebalan lapisan film yang terbentuk lebih tipis dari pada air. Sehingga dengan semakin tebalnya lapisan film yang terbentuk akan mengakibatkan perbedaan temperatur dinding semakin besar maka koefisien perpindahan kalor kondensasi pun akan semakin menurun.



Gambar 7.

Grafik kalor fluks terhadap laju aliran pendingin

Pada kedua fluida pendingin yang digunakan terlihat nanofluida memiliki koefisien perpindahan kalor yang lebih tinggi dari pada air seperti terlihat pada gambar 9,

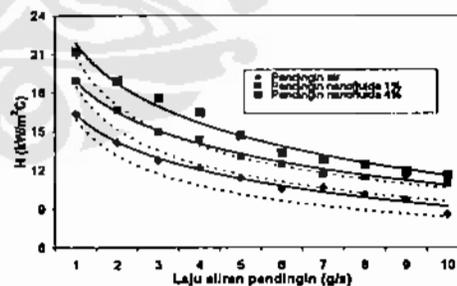


Gambar 8.

Grafik kalor fluks terhadap perbedaan temperatur dinding dan saturasi

ini dikarenakan nanopartikel yang tersuspensi dalam air dapat meningkatkan luas permukaan dan kapasitas kalor dari fluida serta efektifitas konduktivitas termal fluida yang meningkat juga terjadi peningkatan interaksi dan tumbukan antar partikel yang meningkat [7].

Pada gambar 9 dapat dilihat bahwa jika dibandingkan dengan korelasi Nusselt, terlihat bahwa hasil metode Wilson plot tidak terpaut jauh dari korelasi Nusselt, sehingga metode Wilson ini dapat digunakan untuk perhitungan koefisien perpindahan kalor yang terjadi pada dinding kondenser.



Gambar 9.

Grafik koefisien perpindahan kalor kondensasi terhadap perbedaan temperatur

8. Kesimpulan

Dari analisa grafik dan pembahasan dapat disimpulkan bahwa pada proses kondensasi metode Wilson Plot dapat digunakan untuk menentukan koefisien perpindahan kalor kondensasi. Dengan menggunakan nanofluida sebagai media

pendingin diperoleh peningkatan koefisien perpindahan kalor kondensasi, yakni terjadi peningkatan koefisien perpindahan kalor 12% - 19% untuk konsentrasi 1% dan peningkatan 23%- 33% untuk konsentrasi 4% dari fluida pendingin air. Pada kondensasi film, faktor yang paling mempengaruhi dalam menentukan koefisien perpindahan kalor adalah laju aliran, panjang lintasan dan ketebalan kondensat yang terbentuk. Ini dapat terlihat pada perbedaan temperatur yang terjadi antara uap dengan permukaan kondenser.

Nomenklatur

A	luas permukaan
b	perimeter basah
Cp	kalor spesifik pada tekanan konstan
D	diameter
g	gaya gravitasi
h	koefisien perpindahan kalor konveksi
λ	kalor laten penguapan
k	konduktivitas termal
L	panjang
M _m	laju aliran massa
Nu	bilangan Nusselt
Pr	bilangan Prandtl = ν/α
q	kalor
R _k	hambatan konduksi termal
Re	bilangan Reynold
U	koefisien perpindahan kalor keseluruhan
T	temperatur
u	kecepatan fluida

Huruf Yunani

α	difusivitas termal
δ	tebal lapisan kondensat
μ	viskositas absolut
ν	viskositas kinematik
ρ	densitas
Φ	fluks kalor
τ	tegangan geser

Subskrip

f	lapisan film
g, s	kondisi uap saturasi
i	sisi dalam kondenser
l	liquid

o	sisi luar kondenser
w	tinjauan pada dinding

Daftar Acuan

1. Nusselt, W. "The surface condensation of water vapour", Z,Ver, Deutsch.ing 60 (1916) 541-546
2. Bromley, L.A. "Effect of heat capacity of condensate". Industrial and engineering chemistry 44 (1952), 2966-2969
3. Rohsenow, W.M. "Heat transfer and temperature distribution in laminar-film condensation", Transaction of the American Society of mechanical engineers 78 (1956), 1645-1648
4. Sparrow, E.M, and Gregg, J.L. "Laminar free convection from a vertical plate with uniform surface heat flux". Transaction of the American Society of Mechanical Engineers 78 (1956), 435-440
5. Choi, U.S., 1995, "Enhancing Thermal Conductivity of Fluids with Nanoparticles," *Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*, D.A. Siginer and H.P. Wang, eds., FED-vol. 231/MD-Vol. 66, ASME, New York, pp. 99-105.
6. S.K. Das, N. Putra, P. Thiesen, W. Roetzel, "Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids", *J. Heat Transfer*, 125, 567-574 (2003).
7. S.K. Das, N. Putra, W. Roetzel, "Pool boiling characteristics of nanofluids", *Int. J. Heat and Mass Transfer*, 46, 851-862 (2003).
8. Putra, Nandy. "Heat Transfer in Dispersed Media", Aachen : Shacker Verlag, 2002
9. Rose, John W, "Heat transfer coefficients, wilson plot and accuracy of thermal measurement"s, *Experimental Thermal and Fluid Sciences*, 28, 77-86 (2004)
10. A.K. Das, H.P. Kilty, P.J. Marto, "The use an organic self-assembled monolayer coating to promote dropwise condensation of steam on horizontal tube"s, ASME, 122 (2000)