

PENGEMBANGAN KORELASI KOEFISIEN PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI ALAMIAH PADA PERMUKAAN MODEL TANGKI PENYUNGKUP REAKTOR.

Efrizon Umar*, Budi Darmono*, P.Suwono**, P.S.Darmanto**, RPH.Ismuntoyo***

* Pusat Penelitian Teknik Nuklir - Badan Tenaga Atom Nasional

** Laboratorium Termodinamika PAU - IR ITB

*** Pusat Penelitian Teknologi Keselamatan Reaktor - Badan Tenaga Atom Nasional

ABSTRAK

PENGEMBANGAN KORELASI KOEFISIEN PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI ALAMIAH PADA PERMUKAAN MODEL TANGKI PENYUNGKUP REAKTOR. Studi eksperimental untuk mengamati karakteristik perpindahan panas konveksi alamiah pada permukaan luar model tangki penyungkup reaktor merupakan subyek utama penelitian. Penyelidikan yang dilakukan terhadap proses perpindahan panas konveksi alamiah pada permukaan model tangki penyungkup telah menghasilkan korelasi baru yang dapat digunakan untuk memprediksi harga koefisien perpindahan panasnya. Pengaruh perubahan sifat fisis dan fluks panas pada permukaan model ditampilkan dalam korelasi dengan bentuk umum $Nu = f(Ra)$

ABSTRACT

THE DEVELOPMENT OF NATURAL CONVECTION HEAT TRANSFER COEFFICIENT CORRELATION ON THE SURFACE OF REACTOR HEAD VESSEL MODEL. Experimental study to identify the heat transfer characteristics of natural convection on the outer surface of vessel model is subject of this research. Investigations of natural convection heat transfer on the outer surface model have led to a new correlation for heat transfer coefficient. The influence of variabel properties and heat flux on the model surface are presented with the general form $Nu = f(Ra)$.

PENDAHULUAN

Perpindahan panas konveksi alamiah terjadi bila sebuah benda ditempatkan dalam suatu fluida yang temperaturnya lebih tinggi atau lebih rendah daripada benda tersebut [1,2]. Akibat adanya perbedaan temperatur, panas akan mengalir antara fluida dan benda sehingga terjadi perubahan rapat massa fluida yang berada dekat permukaan. Perbedaan rapat massa menyebabkan fluida yang lebih berat mengalir ke bawah dan fluida yang lebih ringan mengalir ke atas sehingga terbentuk arus konveksi alamiah.

Arus konveksi alamiah akan memindahkan energi-dalam yang tersimpan dalam fluida dengan mekanisme yang pada dasarnya sama dengan konveksi paksa, tetapi intensitas gerakan pencampurannya lebih kecil. Akibatnya koefisien perpindahan panas konveksi alamiah relatif lebih kecil daripada koefisien perpindahan panas konveksi paksa. Meskipun koefisien perpindahan panas konveksi alamiah relatif rendah, banyak peralatan sistem pendingin yang mekanisme perpindahan panasnya merupakan proses konveksi alamiah, salah satu diantara-

nya adalah perpindahan panas pada permukaan luar tangki penyungkup reaktor nuklir. Dalam penelitian ini akan dikembangkan korelasi koefisien perpindahan panas konveksi alamiah pada permukaan luar model tangki penyungkup reaktor, baik untuk bagian silinder vertikal maupun untuk bagian sektor bola.

TEORI DASAR

Kaji Analitis Konveksi Alamiah.

Kaji analitis mekanisme perpindahan panas konveksi alamiah pada bidang vertikal biasanya dilakukan dengan menganalisis plat rata vertikal yang dipanaskan. Pemanasan pada plat mengakibatkan terbentuknya lapisan batas konveksi alamiah dan profil kecepatan pada lapisan batas ini berbeda dengan profil kecepatan pada lapisan batas konveksi paksa. Pada dinding plat terjadi kondisi tak-slip sehingga kecepatannya nol, kemudian kecepatan fluida bertambah dengan bertambahnya jarak antara titik yang ditinjau dengan dinding plat. Pada jarak tertentu dari dinding plat dicapai kondisi

kecepatan maksimum dan seterusnya kecepatan turun kembali sampai berharga nol pada tepi lapisan batas. Pada jarak tertentu dari ujung depan, lapisan batas yang terbentuk adalah lapisan batas laminar. Kemudian akibat pengaruh sifat fluida dan beda temperatur antara plat dan fluida, terbentuk pusaran-pusaran sehingga terjadi transisi ke lapisan batas turbulen.

Dalam kaji analitis, persamaan yang mengendalikan perpindahan panas konveksi alamiah seperti persamaan kontinuitas, momentum dan energi harus diselesaikan secara simultan [3], penyelesaian persamaan ditentukan oleh kondisi batas sistem yang dianalisis.

$$\delta u / \delta x + \delta v / \delta y = 0 \quad (2.1)$$

$$u (\delta u / \delta x) + v (\delta u / \delta y) = -g \beta (T - T_{\infty}) + \nu (\delta^2 u / \delta y^2) \quad (2.2)$$

$$u (\delta T / \delta x) + v (\delta T / \delta y) = \alpha (\delta^2 T / \delta y^2) \quad (2.3)$$

Kaji eksperimental konveksi alamiah.

Kaji eksperimental konveksi alamiah biasanya menampilkan rumus empiris untuk setiap kasus yang dianalisis. Rumus empiris yang digunakan untuk memprediksi harga koefisien perpindahan panas konveksi alamiah biasanya dinyatakan dalam bentuk :

$$Nu = C (Gr_f \cdot Pr_f)^m \quad (2.4)$$

Subskrip f menunjukkan bahwa sifat-sifat fluida ditentukan berdasarkan temperatur film.

$$T_f = (T_{\infty} + T_w) / 2 \quad (2.5)$$

Dimensi karakteristik yang digunakan dalam bilangan Nusselt dan Grashof bergantung pada geometri benda yang dianalisis.

Bidang vertikal.

Penelitian perpindahan panas konveksi alamiah dengan fluks panas konstan untuk permukaan vertikal telah dilakukan sejak lama oleh berbagai peneliti. Sparrow dan Gregg [4,5,6] mengembangkan kaji analitis untuk plat vertikal tunggal dengan fluks panas konstan. Kemudian Vliet [7] mengusulkan korelasi koefisien perpindahan panas konveksi alamiah pada permukaan plat datar sebagai fungsi bilangan Grashof yang dimodifikasi.

$$Gr^*_r = (g \beta q_w x^4) / k \nu^2 \quad (2.6)$$

Koefisien perpindahan panas lokal untuk aliran laminar dikorelasikan dalam bentuk :

$$Nu_x = 0,60 (Gr^* \cdot Pr_f)^{0,2} \quad (2.7)$$

$$10^5 \leq Gr^* \leq 10^{11}$$

Hellums dan Churchill [8,9] menggunakan metode numerik untuk jangkauan bilangan Prandtl yang luas. Korelasi yang diusulkan berbentuk :

$$Nu_x = 0,692 (Gr^* \cdot Pr_f)^{0,25}, Pr \rightarrow 0 \quad (2.8)$$

$$Nu_x = 0,563 (Gr^* \cdot Pr_f)^{0,25}, Pr \rightarrow \infty \quad (2.9)$$

Menurut Gebhart [10], korelasi untuk plat vertikal dapat digunakan untuk memprediksi koefisien perpindahan panas konveksi bebas pada silinder vertikal bila memenuhi persyaratan :

$$D/L > (35/Gr_L^{0,25}) \quad (2.10)$$

Kemudian Cebeci [11] melakukan koreksi penggunaan korelasi plat vertikal untuk silinder vertikal. Korelasi perpindahan panas konveksi alamiah untuk silinder vertikal telah diusulkan oleh Al-Arabi [12] dengan bentuk :

$$Nu = 0,60 (Gr^* \cdot Pr_f)^{0,25}, (Gr^* \cdot Pr_f) < 2 \times 10^8 \quad (2.11)$$

Semua sifat fisik dievaluasi pada suhu film, kecuali β yang dievaluasi pada suhu lingkungan.

Permukaan Sektor Bola.

Penelitian perpindahan panas konveksi alamiah pada suatu permukaan sektor bola isothermal yang mengarah ke atas [13] telah menghasilkan korelasi koefisien perpindahan panas dalam bentuk :

$$Nu = 0,49 (Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad (2.12)$$

$$2,8 \times 10^5 \leq (Gr \cdot Pr) \leq 2 \times 10^7$$

$$60 \leq \theta \leq 120 \quad (2.12)$$

Dimensi karakteristik pada kasus ini didefinisikan sebagai perbandingan luas permukaan sektor bola terhadap keliling basah pada dasar sektor bola. Dengan menggunakan dimensi karakteristik tersebut, semua data penelitian yang diperoleh dapat dikorelasikan pada satu

bentuk hubungan bilangan Nusselt dan Rayleigh, sehingga disimpulkan variasi sudut sektor bola tidak memberikan pengaruh pada hubungan empiris yang diusulkan.

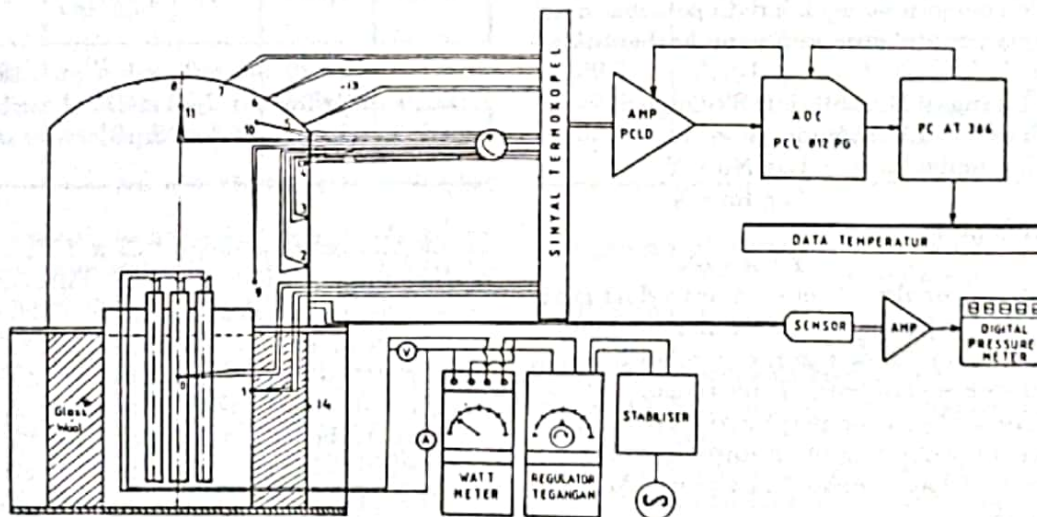
PERANGKAT PENGUJIAN.

Untuk pengkajian dan analisis karakteristik perpindahan panas konveksi alamiah pada permukaan luar model tangki penyungkup reaktor nuklir, telah dirancang dan dibuat suatu model sistem keselamatan reaktor dalam skala laboratorium [14,15]. Model ini terdiri dari beberapa komponen utama seperti tangki penyungkup, pemanas listrik yang berfungsi untuk membangkitkan uap dalam tangki penyungkup serta sistem pengukuran yang meliputi pengukuran temperatur, tekanan dan daya pemanas listrik. Untuk mengukur temperatur air, uap, udara dan dinding tangki penyungkup digunakan termokopel yang dilengkapi dengan *amplifier* dan data akuisisi.

Daya listrik untuk pemanas berasal dari jala-jala PLN dan besar daya listrik diatur sesuai dengan daya yang diinginkan menggunakan regulator tegangan. Besarnya daya listrik diukur menggunakan Wattmeter dan diteliti kembali dengan Voltmeter dan Amperemeter yang dipasang pada bagian depan alat yang dibuat. Rangkaian listrik untuk pemanas dipasang di bagian bawah bantalan penyangga tangki penyungkup sedangkan saklar untuk masing-masing pemanas ditempatkan pada bagian depan alat.

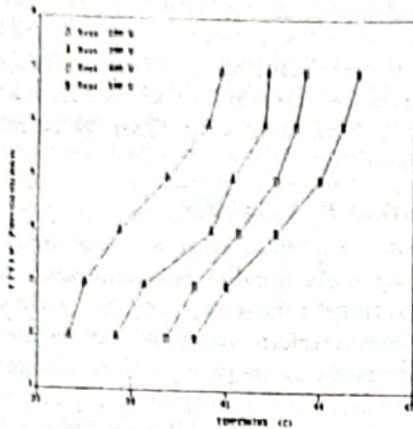
HASIL DAN PEMBAHASAN

Distribusi temperatur dinding tangki penyungkup pada kondisi keseimbangan untuk berbagai tingkat daya dapat dilihat pada Gambar 2. Berdasarkan distribusi temperatur ini dan memperhatikan pula variasi temperatur uap di dalam tangki penyungkup yang relatif kecil, dapat diambil pendekatan bahwa kasus



Gambar 1. Perangkat uji.

yang dianalisis dapat didekati dengan kasus fluks panas konstan.



Gambar 2. Distribusi temperatur pada dinding tangki

Korelasi untuk silinder vertikal.

Korelasi empiris koefisien perpindahan panas konveksi alamiah pada silinder vertikal diperoleh dengan mengolah data percobaan untuk bagian model sungkup yang berbentuk silinder.

Harga bilangan Nusselt dan Rayleigh yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 1.

Dengan memisalkan : $\text{Log Nu} = Y$
 $\text{Log Ra} = X$

Diperoleh persamaan :

$$Y = a + bX$$

Harga b merupakan koefisien arah dari garis $Y = a + bX$ dan harganya dievaluasi menggunakan data pada Tabel 1 dan diperoleh harga a dan b untuk setiap harga fluks panas.

Korelasi koefisien perpindahan panas konveksi bebas yang diusulkan untuk permukaan silinder vertikal dengan fluks panas konstan berbentuk :

$$\text{Nu} = 0,79 (\text{Ra}^*)^{0,27} \quad (4.1)$$

Korelasi berlaku untuk rentangan bilangan Rayleigh yang cukup tinggi yaitu 9×10^8 sampai $1,1 \times 10^{10}$. Bila korelasi ini dibandingkan dengan korelasi yang diusulkan Al-Arabi [12] dengan bentuk :

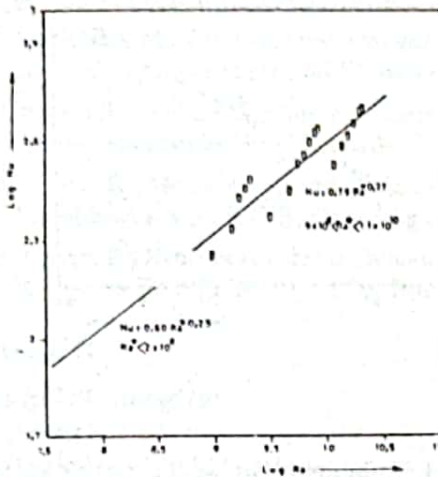
$$\text{Nu} = 0,60 (\text{Ra}^*)^{0,25} \quad (4.2)$$

Tabel 1. Harga bilangan Nusselt dan Rayleigh.

Nu	Log Nu	Ra	Log Ra
178,6	2,252	$8,78 \times 10^8$	8,943
233,4	2,368	$2,93 \times 10^9$	9,467
270,1	2,432	$7,34 \times 10^9$	9,866
215,4	2,333	$1,31 \times 10^9$	9,216
280,4	2,448	$4,33 \times 10^9$	9,648
333,2	2,523	$1,09 \times 10^{10}$	10,048
265,5	2,424	$1,54 \times 10^9$	9,197
336,7	2,527	$5,12 \times 10^9$	9,719
380,7	2,581	$1,27 \times 10^{10}$	10,717
283,4	2,452	$1,76 \times 10^9$	9,255
357,4	2,553	$5,82 \times 10^9$	9,776
410,8	2,614	$1,45 \times 10^{10}$	10,174
298,9	2,476	$1,97 \times 10^9$	9,305
391,7	2,593	$6,58 \times 10^9$	9,829
449,8	2,653	$1,64 \times 10^{10}$	10,225
335,0	2,525	$2,20 \times 10^9$	9,342
420,5	2,624	$7,29 \times 10^9$	9,874
489,9	2,690	$1,82 \times 10^{10}$	10,272
331,2	2,520	$2,32 \times 10^{10}$	9,365
432,9	2,636	$7,73 \times 10^9$	9,901
498,4	2,698	$1,92 \times 10^{10}$	10,298

untuk bilangan Rayleigh $< 2 \times 10^8$, terdapat perbedaan yang cukup besar. Perbedaan ini antara lain disebabkan daerah berlakunya masing-masing korelasi berbeda. Korelasi Al-Arabi berlaku untuk daerah bilangan Rayleigh yang lebih rendah sedangkan korelasi yang diturunkan berlaku untuk bilangan Rayleigh yang relatif lebih tinggi dan mendekati daerah turbulen. Perbedaan kedua korelasi secara lebih nyata dapat dilihat pada grafik Nu vs Ra dalam skala logaritmik. Pada Gambar 3 terlihat daerah berlakunya masing-masing korelasi dan perbedaan kemiringan kedua grafik. Bila kedua data percobaan yang digunakan untuk menurunkan masing-masing korelasi digabung, ada kemungkinan untuk mendapatkan suatu korelasi yang berlaku untuk rentangan bilangan Rayleigh yang lebih luas

sehingga perbedaan yang ada pada kedua ko-relasi awal menjadi tidak berarti.



Gambar 3. Hubungan Nu vs Ra untuk silinder vertikal.

Kalau korelasi yang diusulkan dibandingkan dengan korelasi hasil perhitungan numerik [8,9] untuk kasus plat vertikal dengan bentuk :

$$NU = 0,42 (Ra^*)^{0,25} \quad (4.3)$$

terdapat perbedaan yang lebih besar. Keadaan ini disebabkan karakteristik perpindahan panas pada kasus plat vertikal tidak persis sama dengan silinder vertikal. Keberadaan faktor koreksi Cebeci [11] yang menghendaki perlunya koreksi bila korelasi plat vertikal digunakan untuk memprediksi koefisien perpindahan panas konveksi bebas pada silinder vertikal, mendukung adanya perbedaan karakteristik koefisien perpindahan panas konveksi untuk kedua kasus tersebut.

Korelasi untuk sektor bola.

Korelasi empiris koefisien perpindahan panas konveksi alamiah pada sektor bola diperoleh dengan mengolah data percobaan untuk bagian model sungkup yang berbentuk sektor bola. Harga bilangan Nusselt dan Rayleigh yang diperoleh dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Harga bilangan Nusselt dan Rayleigh

Nu	Log Nu	Ra	Log Ra
119,1	2,076	4,17 x 10 ⁸	8,620
47,6	1,678	1,59 x 10 ⁷	7,201
26,7	1,427	1,69 x 10 ⁶	6,228
147,4	2,168	6,15 x 10 ⁸	8,789
63,9	1,806	2,37 x 10 ⁷	7,735
36,3	1,560	2,53 x 10 ⁶	6,403
172,4	2,237	7,23 x 10 ⁸	8,859
74,3	1,871	2,79 x 10 ⁷	7,446
41,6	1,619	2,96 x 10 ⁶	6,471
187,9	2,274	8,25 x 10 ⁸	8,916
80,4	1,905	3,17 x 10 ⁷	7,501
45,2	1,655	3,38 x 10 ⁶	6,529
201,1	2,303	9,23 x 10 ⁸	8,965
86,5	1,937	3,56 x 10 ⁷	7,551
48,4	1,685	3,78 x 10 ⁶	6,577
220,5	2,353	1,03 x 10 ⁹	9,013
93,9	1,973	3,95 x 10 ⁷	7,597
52,6	1,721	4,20 x 10 ⁶	6,623
229,7	2,361	1,09 x 10 ⁹	9,039
96,8	1,986	4,19 x 10 ⁷	7,622
55,1	1,741	4,46 x 10 ⁶	6,649

Dengan memisalkan : Log Nu = Y
Log Ra = X

Diperoleh persamaan :

$$Y = a + bX$$

Harga b merupakan koefisien arah dari garis Y = a + bX dan harganya dievaluasi menggunakan data pada Tabel 2 dan diperoleh harga a dan b untuk setiap harga fluks panas.

Korelasi untuk sektor bola diturunkan berdasarkan metode yang digunakan pada kasus sektor bola temperatur konstan [13].

Dalam metode ini didefinisikan dimensi karakteristik sebagai perbandingan luas permukaan sektor bola terhadap keliling basah pada dasar sektor bola.

Untuk model tangki penyungkup yang dibentuk oleh dua komponen yaitu silinder vertikal dan sektor bola, analisis dilakukan dengan

cara mengidentikkan tangki penyungkup sebagai sektor bola untuk θ sebesar 120° , sehingga keberadaan silinder pada bagian bawah sungkup tidak mempengaruhi kondisi lapisan batas pada permukaan sektor bola.

Bentuk korelasi yang diusulkan untuk bagian sektor bola berbentuk :

$$Nu = 0,74 (Ra^*)^{0,269} \quad (4.4)$$

Korelasi dapat digunakan untuk memprediksi koefisien perpindahan panas konveksi bebas dalam rentangan bilangan Rayleigh yang relatif luas yaitu 6×10^0 sampai $1,1 \times 10^9$. Selain luasnya jangkauan berlakunya korelasi, pemilihan dimensi karakteristik sebagai perbandingan luas sektor bola terhadap keliling basah pada dasar bola ternyata juga memberikan hasil yang memuaskan sebab semua data percobaan terkorelasi dengan baik. Keadaan ini dapat dilihat pada koefisien korelasi yang diperoleh (0,97).

Hubungan antara bilangan Nusselt dengan bilangan Rayleigh dalam skala logaritmik untuk kasus sektor bola dapat dilihat pada Gambar 4.

Bila hasil yang diperoleh dibandingkan dengan korelasi untuk sektor bola dengan pendekatan temperatur konstan [15].

$$Nu = 0,49 (Ra)^{0,25} \quad (4.5)$$

$$2,85 \times 10^5 \leq Ra \leq 2,8 \times 10^7, \quad Pr = 0,7$$

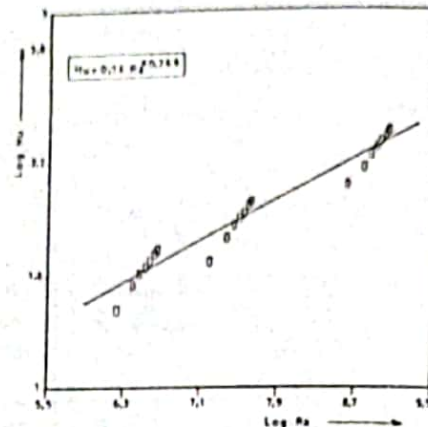
dan korelasi untuk *platforms* [30,45] dengan dimensi karakteristik sama dengan kasus yang dianalisis :

$$Nu = 0,15 (Ra)^{0,27} \quad (4.6)$$

$$10^7 \leq Ra \leq 10^{10}$$

DAFTAR PUSTAKA

1. Homan, J. P., Heat Transfer, Mc Graw Hill Ltd, New York (1986).
2. Kreith, F., Principles of Heat Transfer, Harper International Edition, New York (1973).
3. Schlichting, H., Boundary Layer Theory, Mc.Graw Hill Book Company, New York (1979).
4. Sparrow, E. M., Laminar free convection from a vertical plate with uniform surface heat flux, ASME Transactions (1956), 435-440.
5. Sparrow, E. M., Similar solutions for free convection from a non isothermal vertical plate, ASME Transactions, Vol 80 (1958), 379-386.
6. Wirts, R. A., Experiments on free convection between vertical plates with symmetric heating, Journal of Heat Transfer, Vol 104 (1982), 501-507.
7. Vliet, G. C., Natural convection local heat transfer on constant heat flux inclined surface, Journal of Heat Transfer, Vol 91 (1969), 511-516.



Gambar 4. Hubungan Nu Vs Ra^* untuk sektor bola dengan fluks panas konstan.

kemiringan grafik Nu Vs Ra berada pada daerah yang relatif sama (0,2 - 0,3), meskipun pendekatan yang diambil dalam analisis berbeda.

KESIMPULAN

Korelasi empiris untuk memprediksi harga koefisien perpindahan panas konveksi alamiah untuk geometri silinder vertikal dan sektor bola berbentuk :

$$Nu = 0,79 (Ra^*)^{0,27} ; \text{ untuk silinder vertikal}$$

$$Nu = 0,74 (Ra^*)^{0,269} ; \text{ untuk sektor bola}$$

Korelasi dapat digunakan dalam rentangan bilangan Rayleigh yang relatif besar.

8. Hellums, J. D., Mathematical simplification of boundary and initial value problems, *AICHE Journal*, Vol 10 (1964) 110-114
9. Churchill, S. W., A Correlation for laminar free convection from vertical plate, *Jornal of Heat Transfer* (1973), 520-541.
10. Gebhart, B., *Heat Transfer*, Mc.Graw Hill Book Company, New York (1970).
11. Cebeci, T., Laminar free convection heat transfer from the outer surface of a vertical circular cylinder, *Proc. Int.Heat Transfer*, Tokyo (1974), 15-19.
12. Al-Arabi, M., Laminar natural convection heat transfer from an inclined cylinder, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol 23 (1980), 45-51.
13. Stewart, W. E., Experimental natural convection heat transfer from isothermal spherical zones, *Journal of Heat Transfer*, Vol 107 (1985), 463-465.
14. Umar, E., Model sistem pengaman dalam kecelakaan fatal reaktor nuklir, Laporan Penelitian PAU-IR ITB, Bandung (1991).
15. Umar, E., Studi karakteristik sistem pendingin pada model sungkup reaktor, Tesis Magister Rekayasa Tenaga Nuklir, ITB, Bandung (1993).

DISKUSI

Widji Ediologito:

1. Apakah fluida yang digunakan dipercobaan sama dengan percobaan peneliti sebelumnya ?
2. Apakah hasil akhir bilangan Nusselt sama dengan hasil percobaan peneliti sebelumnya ?

Efrizon Umar:

1. Fluida kerja yang digunakan dalam pecobaan adalah sama dengan tekanan atmosfir. Peneliti sebelumnya juga menggunakan udara.
2. Hasil akhir yang diperoleh tidak sama karena daerah pengamatan juga berbeda. Korelasi yang diturunkan berlaku untuk daerah kerja yang relatif besar (bilangan Rayleigh besar) sedangkan korelasi peneliti sebelumnya untuk daerah bilangan Rayleigh yang kecil.