

KONVEKSI ALAM DALAM MEDIUM BERPORI

Natural Convection in Porous Media

Abdulkadir¹, Indarto², Samsul Kamal²

Program Studi Teknik Mesin

Program Pascasarjana Universitas Gadjah Mada

ABSTRACT

Natural convection in porous media is a complex phenomenon. Consequently the governing equations related are also complicated and very difficult to solve exactly.

The objective of the research is to determine the influence of thermophysical properties of the porous media on the natural convection heat transfer.

The research investigated the effect of Rayleigh number on convection heat transfer in porous media filled water in a 50 cm length, 5 cm width and 50 cm height model heated isothermally from below. From four variations of the media Rayleigh number, 42.23, 165.81, 374.53 and 421.84, it is concluded that the higher in Rayleigh number the higher in convection heat transfer.

Key words : porous media, natural convection, Rayleigh number

PENGANTAR

Konveksi dalam medium berpori merupakan fenomena yang kompleks, karena mencakup proses aliran fluida dan aliran kalor. Dengan demikian maka persamaan atur yang berkaitan dengan proses itu juga sangat kompleks dan rumit. Untuk mendapatkan pemecahan secara eksak atas persamaan atur itu hanya dimungkinkan untuk kasus-kasus yang sederhana dan dengan kondisi yang ideal. Pada kenyataan, kasus yang terjadi biasanya sangat kompleks dan dengan kondisi yang tidak ideal. Medium berpori itu sendiri di alam terdiri atas beraneka susunan, baik dalam bentuk, ukuran, maupun bahannya.

¹ Jurusan Teknik Mesin STTNAS, Yogyakarta

² Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada

Berbagai upaya telah dilakukan untuk mencari penyelesaian atas persoalan itu, tetapi hanya sebatas kondisi yang relatif sederhana dengan sifat-sifat medium yang dianggap ideal.

Oleh sebab itu, untuk mengkaji proses konveksi alam dalam medium berpori yang mendekati keadaan di alam, diperlukan eksperimen, baik mengenai bahannya maupun prosesnya.

Trevisan dan Bejan (1987) menganalisis secara numerik sistim konveksi alam dua dimensional dalam medium berpori dengan bilangan Rayleigh tinggi yang mendapat pemanasan dari bawah. Dari hasil analisis terbukti bawa laju perpindahan kalor semakin besar bila bilangan Rayleigh (Ra) semakin besar dan nilai H/L ('aspect ratio') semakin kecil.

Peirotti dkk. (1987) , menganalisis secara numerik sistim perpindahan kalor secara konveksi dalam ruang empat persegi panjang yang berisi medium berpori yang kedua dinding vertikalnya dipertahankan pada suhu yang berbeda dan kedua dinding horisontalnya diisolasi. Ternyata bahwa bila nilai H/L semakin besar, maka nilai Nu (bilangan Nusselt) semakin kecil untuk $H/L > 1$ dan $Ra > 0$; nilai Nu semakin besar bila $H/L < 1$ dan $Ra < 1000$, dan nilai Nu semakin kecil bila $H/L < 1$ dan $Ra > 7500$.

Bejan (1984), dengan analisis stabilitas pada model aliran Bernard dan model 'layer' berpori yang dipanaskan dari bawah, membuktikan bahwa pada $Ra < 40$ laju perpindahan kalor yang terjadi dapat dianggap sebagai konduksi murni. Konveksi akan memainkan peranan pada $Ra > 40$ sehingga pada keadaan ini perlu dilakukan perhitungan secara numerik atau dilakukan eksperimen.

Medium berpori di alam biasanya tersusun atas komponen-komponen yang sangat kompleks, baik bentuk, ukuran, maupun bahannya. Namun, untuk penyederhanaan dalam analisis, biasanya diadakan asumsi-asumsi berikut (Bories, 1987; Garg dan Kassoy, 1981) : 1) matriks padatan homogen, isotropis, tak berubah dan secara kimiawi tak bereaksi dengan fluida yang bersangkutan, 2) fluida satu fase, Newtonian, dan tak termampatkan, 3) sifat-sifat termofisis fluida yang meliputi ρ , μ , α dianggap konstan, kecuali yang berkaitan dengan gaya apung (pendekatan Boussinesq), 4) perpindahan kalor radiasi dan disipasi viskos diabaikan.

Dengan dasar asumsi-asumsi tersebut di atas dan setelah diadakan berbagai penyederhanaan, maka persamaan atur konveksi alam dalam medium berpori dapat diungkapkan dalam variabel tanpa dimensi sebagai berikut (Bories, 1987) :

Hukum kekekalan massa :

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (1)$$

Hukum kekekalan momentum :

$$\nabla \bar{P} - \vec{V} + Ra \cdot \hat{k} = 0 \quad (2)$$

Hukum kekekalan energi :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \nabla^2 T - \vec{V} \cdot \nabla T \quad (3)$$

Perubahan rapat massa fluida akibat perubahan temperatur dapat dinyatakan dengan :

$$\rho = \rho_0 \{1 - \beta(T - T_0)\} \quad (4)$$

Dengan mencari penyelesaian persamaan (1), (2), dan (3) secara simultan akan diperoleh distribusi temperatur (T), distribusi kecepatan (\vec{V}), dan distribusi tekanan (P) pada setiap titik dan setiap saat (t). Selain itu, pada persamaan (2) terdapat parameter tanpa dimensi, bilangan Rayleigh (Ra), yaitu :

$$Ra = g \frac{\alpha(\rho C)_f K}{\nu \lambda} \Delta TH \quad (5)$$

Jadi, bilangan Rayleigh adalah parameter yang sangat penting pada proses konveksi alam dalam medium berpori

Dari persamaan (2) dapat diperkirakan bahwa secara umum bila Ra semakin besar, maka \vec{V} akan semakin tinggi. Dengan demikian, konveksi kalor semakin besar juga.

Secara fisis, bilangan Rayleigh menggambarkan kompetisi antara gaya apung, gaya gesek, aliran entalpi, aliran konduksi, dan kemudahan mengapung. Dengan cara lain, bilangan Rayleigh dapat diungkapkan sebagai :

$$Ra = \frac{(\rho g \beta \Delta T) (H^2 \rho C \Delta T)}{\left(\mu \frac{\nu}{H^2}\right) \left\{k H^2 \left(\frac{\Delta T}{H}\right)\right\}} \left(\frac{K}{H^2}\right) \quad (6)$$

atau :

$$Ra = \frac{[gaya - apung]}{[gaya - gesek]} \frac{[aliran - entalpi]}{[aliran - konduksi]} [kemudahan - mengalir] \quad (7)$$

Bila pada suatu medium hanya terjadi perpindahan kalor secara konduksi murni, maka persamaan aturnya adalah :

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \nabla^2 T \quad (8)$$

Untuk sistim 1 (satu) dimensional, persamaan (9) dapat disederhanakan menjadi

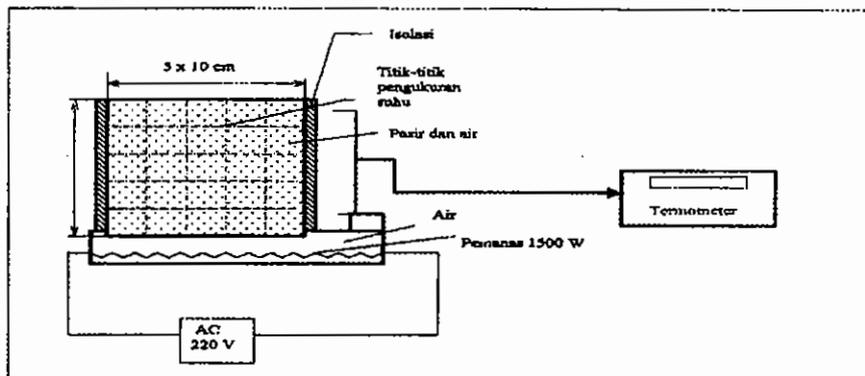
$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \right) \quad (9)$$

CARA PENELITIAN

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah : 1) Medium berpori, dalam penelitian ini digunakan 4 (empat) macam pasir dengan ukuran butiran yang berbeda-beda, yaitu : (a) pasir 1 dengan ukuran 0,5 mm - 0,9 mm, (b) pasir 2 dengan ukuran 1 mm - 1,5 mm, (c) pasir 3 dengan ukuran 1,7 mm - 2,5 mm, dan (d) pasir 4 dengan ukuran 2,7 mm - 3,5 mm, 2) Air sebagai medium cair.

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah : 1) alat penunjang yang berupa konduktimeter, kalorimeter, permeabimeter, neraca, dan gelas ukur. Alat ini digunakan untuk melakukan penelitian pendahuluan, yaitu untuk mengukur sifat-sifat termofisis medium berpori yang akan diteliti, 2) alat utama berupa rangkaian (a) model yang berbentuk kotak kaca yang sisi-sisi sampingnya diisolasi, sisi bawahnya dipanaskan, dan sisi atasnya terbuka, (b) pemanas berupa kotak yang berisi air yang dijaga selalu mendidih, (c) termokopel, (d) termometer digital.

Rangkaian alat penelitian utama selengkapnya disajikan pada gambar 1.



Gambar 1. Skema rangkaian alat penelitian

Penelitian ini meliputi :

1. penelitian pendahuluan, yaitu mengukur sifat-sifat termofisis keempat medium berpori-pori (pasir) yang akan dijadikan bahan penelitian, meliputi permeabilitas, konduktivitas, porositas, massa jenis, dan panas jenis,

2. penelitian utama dilakukan dengan mengukur suhu titik-titik pengukuran yang telah ditentukan pada medium berpori-pori di dalam model yang mendapat pemanasan dari bawah dengan air mendidih. Pengukuran suhu dilakukan setiap selang waktu 5 menit dan terus dilanjutkan hingga kondisi mendekati tunak. Hal itu dilakukan terhadap 4 macam pasir yang berbeda, dan masing-masing dilakukan 4 kali pengukuran.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Hasil Penelitian Pendahuluan

Dari pengukuran sifat-sifat termofisis 4 (empat) macam pasir yang diuji diperoleh data seperti disajikan pada Tabel 1, dan ternyata bahwa pasir dari berbagai ukuran butiran memiliki sifat-sifat termofisis yang hampir sama, kecuali permeabilitasnya.

Tabel 1. Sifat-sifat termofisis pasir dari berbagai ukuran

	Ukuran Butiran (mm)	Densitas (kg/m ³)	Porositas (%)	Kalor Jenis (J/kg K)	Permeabilitas (m ²)	Konduktivitas (W/m K)
Pasir 1	0,5 - 0,9	1450,964	50,5	995,6913	2,064E-10	2,5304
Pasir 2	1 - 1,5	1422,874	43,51	1026,078	6,723E-10	2,0993
Pasir 3	1,7 - 2,5	1367,315	46,76	1089,403	1,547E-9	2,1383
Pasir 4	2,7 - 3,5	1382,117	47,25	1219,928	1,841E-9	2,3124

Nilai bilangan Rayleigh

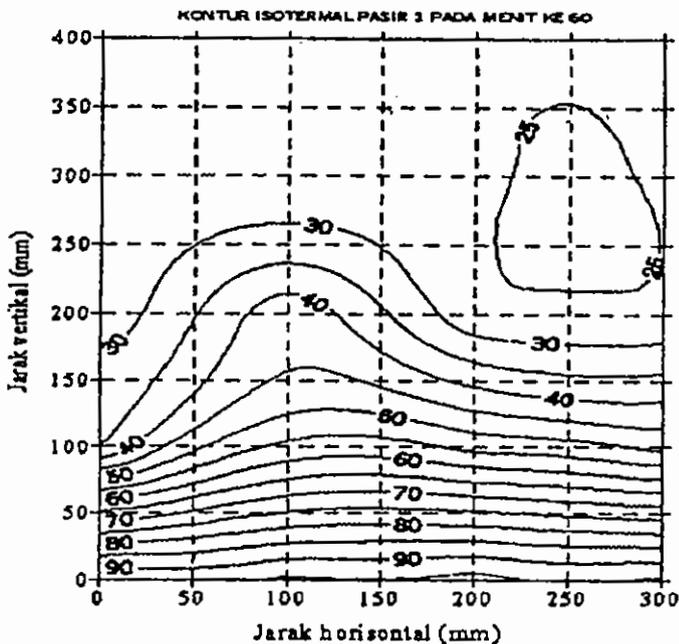
Dari data sifat-sifat termofisis pasir, khususnya konduktivitas dan permeabilitas, sifat-sifat termofisis air, dan kondisi penelitian, maka dapat dicari nilai bilangan Rayleigh untuk setiap pasir sesuai dengan persamaan (6). Nilai-nilai itu disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Perhitungan nilai bilangan Rayleigh

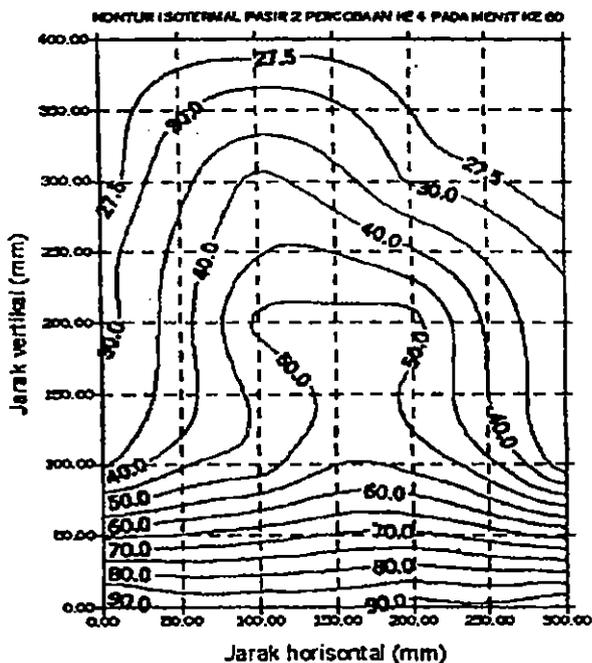
	k (W/m °C)	H (m)	ΔT (°C)	K (m ²)	$\frac{g\beta\rho C_p}{\nu}$ (W/m ⁴ °C ²)	R_a
Pasir 1	2,5304	0,5	68	2,064E-10	1,5227E10	42,2298
Pasir 2	2,0993	0,5	68	6,723E-10	1,5227E10	165,8102
Pasir 3	2,1383	0,5	68	1,547E-9	1,5227E10	374,5336
Pasir 4	2,3124	0,5	68	1,884E-9	1,5227E10	421,8436

Distribusi Temperatur

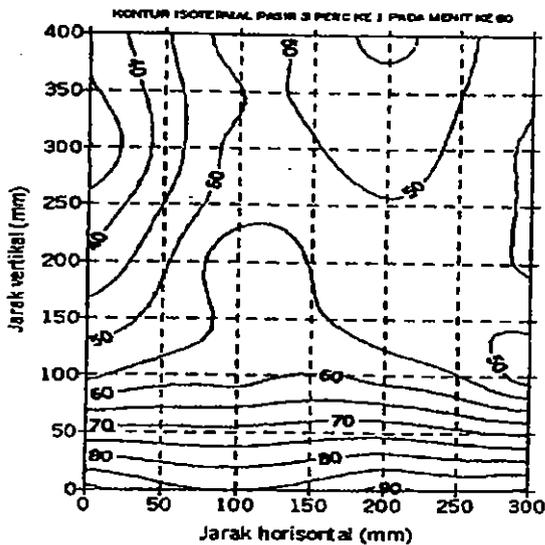
Dari hasil pengukuran temperatur pada titik-titik tertentu diperoleh distribusi temperatur dari waktu ke waktu, yang diungkapkan dalam bentuk kontur-kontur isotermal. pada menit ke 60, yang disajikan pada Gambar 2 sampai 5.



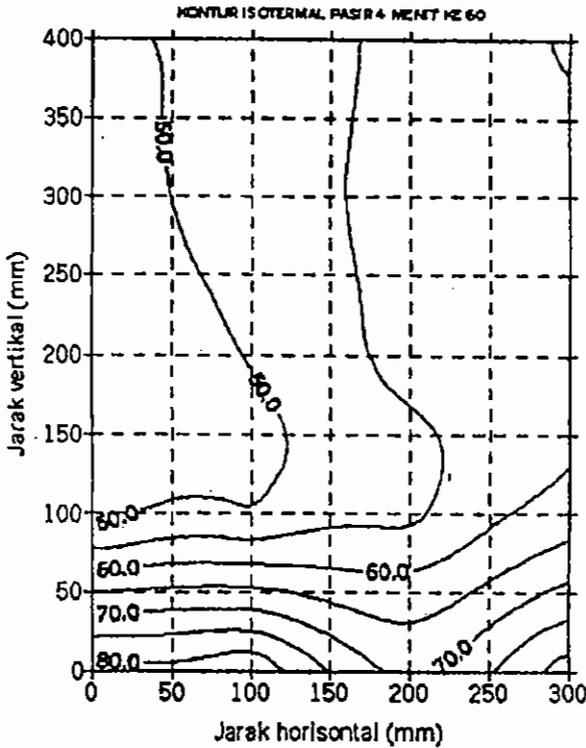
Gambar 2. Kontur Isotermal Proses Pemanasan Pasir 1
($R_a = 42,23$) pada Menit ke 60



Gambar 3. Kontur Isotermal proses Pemanasan Pasir 2 ($Ra = 165,81$) pada menit ke 60



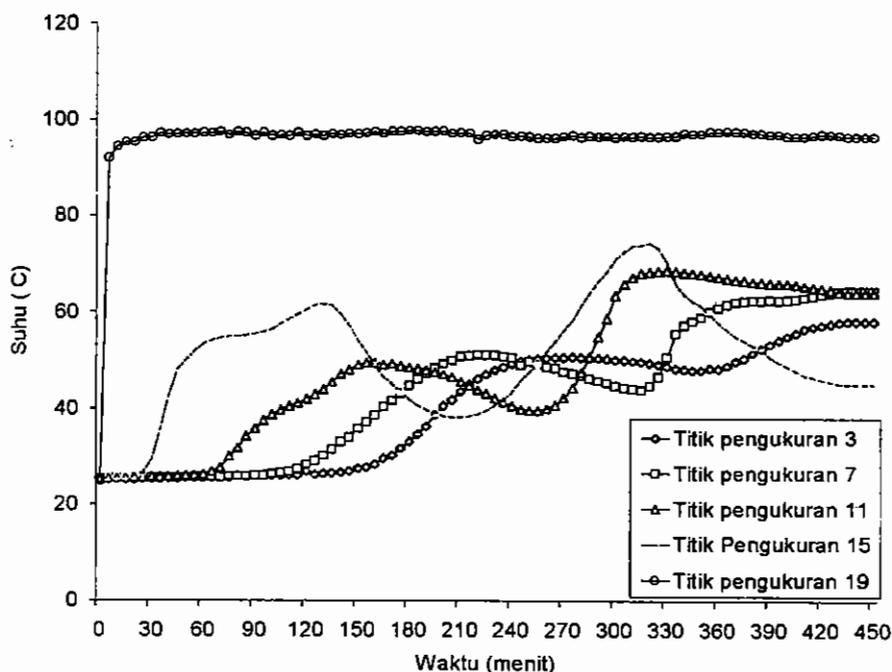
Gambar 4. Kontur Isotermal proses Pemanasan Pasir 3 ($Ra = 374,53$) pada menit ke 60



Gambar 5. Kontur Isothermal Proses Pemanasan Pasir 4
($Ra = 421,84$) pada Menit ke 60

Dari pola kontur isothermal dapat dilihat bahwa untuk nilai bilangan Rayleigh yang semakin besar secara umum semakin cepat kenaikan suhunya, sebab terjadi konveksi kalor yang lebih besar pula.

Untuk memperjelas terjadinya konveksi, selain kontur isothermal, diungkapkan juga kurva korelasi temperatur dengan waktu pada beberapa titik pengukuran. Bila pada suatu titik terjadi kenaikan temperatur yang relatif besar dalam waktu yang relatif singkat, maka hal ini menunjukkan bahwa terjadi konveksi kalor. Dalam hal ini hanya ditinjau pasir dengan bilangan Rayleigh terkecil, yaitu pasir 1 dengan bilangan Rayleigh 42,23. Kurva itudisajikan pada Gambar 6.



Gambar 6. Kurva korelasi suhu dengan waktu beberapa titik pengukuran pada pasir 1 ($Ra = 42,23$)

Dari Gambar 6 dapat dilihat bahwa suhu pada suatu titik pada suatu waktu tertentu terjadi lonjakan yang menunjukkan bahwa pada titik-titik itu telah terjadi konveksi.

Kenaikan Entalpi

Kenaikan entalpi dapat dijadikan indikator besarnya perpindahan kalor konveksi. Semakin cepat kenaikan entalpinya berarti semakin besar koefisien perpindahan kalor konveksi pada permukaan medium yang menerima pemanasan.

Kenaikan entalpi campuran pasir dan air pada setiap saat dapat dihitung secara numerik dengan persamaan :

$$\Delta \bar{h}^t = C \cdot \Delta \bar{T} \quad (10)$$

Entalpi rata-rata mula-mula adalah :

$$h^0 = C \cdot \bar{T}^0 \quad (11)$$

Perbandingan antara kenaikan entalpi rata-rata dengan suhu mula-mula rata-rata adalah :

$$\frac{\Delta \bar{h}^k}{h^0} = q^k = \frac{\Delta \bar{T}}{\bar{T}^0} \quad (12)$$

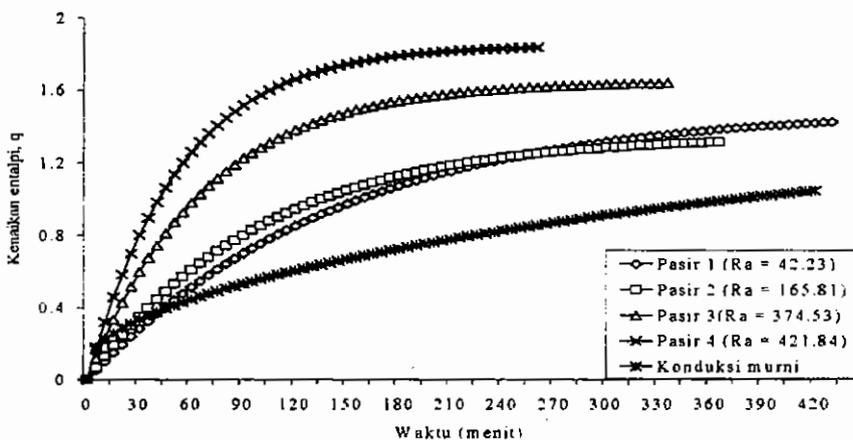
Bila perhitungan dilakukan terhadap seluruh elemen pada arah horisontal dan arah vertikal, maka

$$q^k = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (T_{i,j}^k - T_{i,j}^0)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T_{i,j}^0} \quad (13)$$

Dari pengamatan korelasi antara q^k dengan waktu (t) untuk pasir 1, pasir 2, pasir 3, dan pasir 4 dapat diperkirakan bahwa pola korelasi regresinya adalah

$$q = K_1 (1 - e^{-K_2 t}) \quad (14)$$

dengan K_1 dan K_2 masing-masing adalah konstante korelasi yang nilainya dicari berdasarkan penyimpangan standar terkecil, sehingga dapat digambarkan korelasi antara q dengan waktu untuk berbagai pasir yang diteliti seperti disajikan pada Gambar 7. Selain itu, sebagai pembandingan, ditampilkan juga kenaikan entalpi medium yang memiliki sifat-sifat termofisis sama dengan pasir 1 tetapi dianggap hanya terjadi konduksi murni, yang perhitungan distribusi temperatur dan kenaikan entalpinya dilakukan secara numerik.



Gambar 7. Korelasi secara regresi antara kenaikan entalpi (q) dengan waktu pada keempat pasir serta pasir yang hanya terjadi konduksi murni

Gambar 7 menunjukkan bahwa pasir dengan nilai bilangan Rayleigh yang semakin besar, semakin cepat mengalami kenaikan entalpi, sebab proses konveksi kalor juga semakin besar. Untuk nilai bilangan Rayleigh yang terkecil (42,23), kenaikan entalpi masih lebih besar daripada bila pada medium itu hanya terjadi konduksi murni.

Koefisien perpindahan panas konveksi

Koefisien perindahan kalor konveksi dapat dicari dengan persamaan :

$$h = -k \frac{\partial T / \partial z |_{z=0}}{T_w - T_\infty} \quad (15)$$

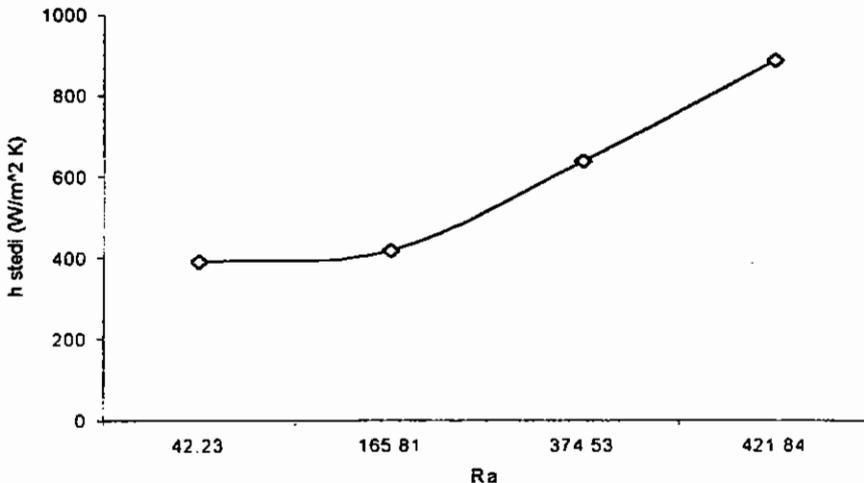
dengan cara pendekatan, dapat ditulis sebagai :

$$h = -k \frac{\Delta T / \Delta z |_{z=0}}{T_w - T_\infty} \quad (16)$$

Berdasarkan pengukuran yang dilakukan, maka :

$\Delta T = T'_w - T_w$, $\Delta z = 1 \text{ mm}$ (0,001 m), $T_w = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_\infty =$ diambil suhu rata-rata antara suhu permukaan bawah dengan suhu pada titik pengukuran di atasnya.

Korelasi antara h dengan bilangan Rayleigh pada keadaan tunak (steady) disajikan pada Gambar 8.



Gambar 8. Korelasi antara koefisien perpindahan kalor konveksi stedi dengan bilangan rayleigh

Dari Gambar 8 tampak bahwa semakin besar nilai bilangan Rayleigh nilai koefisien perpindahan kalor konveksi (h) pada keadaan stedi semakin besar pula. Pada nilai Ra antara 40 dengan 160 tidak terjadi kenaikan nilai h yang signifikan, tetapi pada nilai Ra antara 160 dengan 420 terjadi kenaikan nilai h yang cukup besar. Hal itu menunjukkan bahwa korelasi antara h dengan Ra tidak linear.

KESIMPULAN

Hasil penelitian pendahuluan menunjukkan bahwa pasir dari bahan yang sama dengan ukuran yang semakin besar memiliki permeabilitas yang semakin besar, sedangkan sifat-sifat termofisis lainnya tidak terlalu besar perbedaannya

Penelitian utama, yaitu pasir di dalam model yang berbentuk kotak dengan ukuran panjang 50 cm, lebar 5 cm, dan tinggi 50 cm yang terisi air secara jenuh dan mendapatkan pemanasan dari bawah, bilangan Rayleigh antara 42,23 dengan 421,84, menunjukkan bahwa semakin cepat kenaikan entalpinya nilai bilangan Rayleighnya semakin besar, yang membuktikan bahwa terjadi konveksi kalor yang semakin besar pula.

Pada bilangan Rayleigh sekitar 40 sudah terjadi proses konveksi, karena kenaikan entalpi jauh lebih besar daripada bila terjadi konduksi murni dan juga dari terjadinya lonjakan suhu yang cukup besar

Perhitungan koefisien perpindahan kalor konveksi (h) juga membuktikan bahwa semakin besar nilai bilangan Rayleigh semakin besar pula harga h , namun korelasi antara h dan Ra tidak linear.

DAFTAR PUSTAKA

- Bejan, A., 1984, "Convection Heat Transfer", John Wiley & Sons, New York
- Bories, S., 1987, "Natural Convection in Porous Media", Martinus Nijhoff Publishers, Dordrecht.
- Garg, K.S. and Kassoy, R.D., 1981, "Convective Heat and Mass Transfer, Geothermal Systems : Principles and Case Histories", John Wiley & Sons, New York

- Peirotti, M.B., Giavedoni, M.D, and Deiber, J.A., 1987, "Natural Convective Heat Transfer in a Rectangular Porous Cavity with Variable Fluid Properties - Validity of the Boussinesq Approximation", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 30, (11), 2571-2581.
- Trevisan, O.V. and Bejan A., 1987, "Mass and Heat Transfer by High Rayleigh Number Convection in a Porous Medium Heated from Below", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 30, (11), 2341-2356.