

## PENENTUAN KORELASI EMPIRIS LOKAL PERPINDAHAN PANAS PADA BAGIAN SEKTOR ELLIPS MODEL SUNGKUP AP1000

Nanang Triagung Edi Hermawan

Direktorat Pengaturan Pengawasan Fasilitas Radiasi dan Zat Radioaktif  
BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR  
Jln. Gajah Mada No.8 Jakarta Pusat 10120  
[n.triagung@bapeten.go.id](mailto:n.triagung@bapeten.go.id)

### Abstrak

Teknologi reaktor nuklir merupakan salah satu aplikasi teori fisika inti dengan memanfaatkan energi yang timbul dari reaksi pembelahan inti bahan bakar nuklir. Desain Reaktor AP1000 menerapkan pendinginan permukaan sungkup dengan aliran udara secara alamiah. Aliran udara mengalir pada celah dalam dari arah bawah pada bagian silinder konsentris, menuju bagian sektor ellips pada sisi atas permukaan sungkup. Karakteristik perpindahan panas pada bagian sektor ellips penting untuk diketahui karena pada bagian ini terjadi akumulasi panas yang diangkut dari bagian silinder konsentris. Perpindahan panas konveksi alamiah yang terjadi dapat digambarkan dengan persamaan korelasi empiris. Telah dilakukan studi eksperimental skala laboratorium pada model sungkup AP1000 dengan perbandingan ukuran 1:40. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa pendinginan permukaan sungkup pada skenario kecelakaan dapat berlangsung dengan optimal. Temperatur rata-rata permukaan luar sungkup sebesar 55,82 °C (jauh di bawah titik rekristalisasi SS-304, yaitu sekitar 900 °C). Persamaan korelasi empiris lokal untuk bagian sektor ellips yang didapatkan adalah  $Nu_x = 0,577Ra^{*0,2532}$ , berlaku untuk rentang bilangan Rayleigh  $7,51 \times 10^5 < Ra^* < 7,08 \times 10^{10}$ .

**Kata kunci:** reaktor AP1000, pendinginan sungkup, sektor ellips, dan korelasi empiris.

### Abstract

Nuclear reactor technology is one application of the theory of nuclear physics by using energy generated from fission reaction in nuclear fuel. AP1000 reactor design applies containment surface cooling by natural air flow. Air flows at inner gap from bottom of concentric cylindrical ellipse sector part to upper of containment surface. Heat transfer characteristic on ellipse sector is very important to be known because in this part heat accumulation from cylindrical heat transfer is happened. Natural convection heat transfer could be represented by empirical correlation equation. Experimental studies have been done on AP1000 containment model proportion 1:40. The result of the experiment indicates that containment surface cooling in accident scenario could be happened optimally. Average temperature of the outer surface of containment is 55.82 °C (well below re-crystallization point for SS-304, which is about 900 °C). The local empirical correlation from this experiment is  $Nu_x = 0,577Ra^{*0,2532}$ , for Rayleigh numbers  $7,51 \times 10^5 < Ra^* < 7,08 \times 10^{10}$ .

**Keywords:** AP1000 reactor, containment cooling, ellipse sector, and empirical correlation.

## 1. Pendahuluan

Reaktor AP1000 merupakan teknologi reaktor nuklir Generasi III+. Salah satu sistem keselamatan pasif yang terpenting pada desain reaktor ini adalah sistem pendinginan permukaan sungkup secara pasif atau konveksi bebas. Sungkup merupakan perangkat pelindung yang sangat menentukan sistem keselamatan reaktor nuklir. Sungkup memiliki peran ganda sebagai pelindung struktur, sistem, dan

komponen yang berada di bawahnya dari bahaya eksternal, sekaligus sebagai penghalang terakhir untuk mencegah terjadinya kebocoran radiasi ke lingkungan hidup. Mengingat sangat pentingnya fungsi sungkup, maka selama masa operasi reaktor nuklir, kekuatan dan integritas sungkup harus memiliki unjuk kinerja prima. Salah satu caranya adalah dengan pendinginan permukaan sungkup dengan udara yang bersirkulasi alamiah.

Udara bebas dialirkan melalui celah luar, kemudian melewati celah dalam pada bagian silinder konsentris, naik ke atas hingga melewati sektor ellipsis. Sektor ellipsis merupakan permukaan sungkup yang berbentuk ellipsis di bagian atas. Panas yang diangkut aliran udara dari bawah akan terakumulasi pada bagian ini, sebelum akhirnya mengalir keluar melalui cerobong keluaran udara. Dengan demikian, karakteristik perpindahan panas yang terjadi pada bagian ini menjadi penting untuk diketahui dan dikaji guna memastikan unjuk kinerja sistem sungkup secara keseluruhan. Penelitian ini merupakan kelanjutan dari penelitian yang dilakukan sebelumnya untuk menentukan persamaan korelasi empiris lokal perpindahan panas pada bagian silinder konsentris[1]. Adapun tujuan dilakukannya studi eksperimental untuk penentuan persamaan korelasi empiris lokal perpindahan panas pada sektor ellipsis model sungkup AP1000 diantaranya adalah:

- mengetahui temperatur rata-rata pada sektor ellipsis permukaan dinding sungkup untuk berbagai fluks panas pengoperasian; dan
- menentukan rumusan persamaan korelasi empiris lokal perpindahan panas yang terjadi.

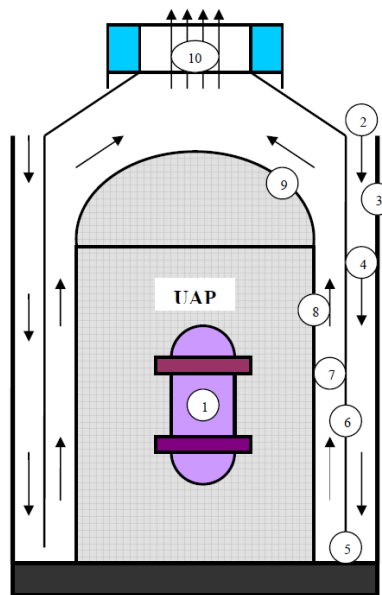
#### Metodelogi Penelitian

Penelitian mengenai penentuan korelasi empiris lokal perpindahan panas pada sektor ellipsis model sungkup AP1000 untuk pendinginan dengan udara yang bersirkulasi alamiah ini dilakukan dengan pengoperasian model AP1000 pada kondisi *transient*

maupun *steady state* untuk beberapa variasi fluks panas pengoperasian. Parameter operasional yang diukur adalah temperatur pada permukaan dinding sungkup bagian luar dan pada permukaan dinding bafel bagian dalam. Data temperatur tersebut selanjutnya diolah untuk mengetahui propertis udara, perhitungan bilangan tak berdimensi, hingga perumusan persamaan korelasi empiris lokal perpindahan panas konveksi yang terjadi.

## 2. Dasar Teori

Proses pendinginan permukaan sungkup Reaktor AP1000 dilakukan dengan mengalirkan udara yang bersirkulasi alamiah melalui saluran udara celah dalam. Geometri permukaan sungkup dapat dibedakan menjadi dua bagian, yaitu bagian silinder konsentris dan sektor ellipsis. Udara mengalir pada celah dalam dari arah bawah. Molekul udara yang mendapat aliran panas dari permukaan dinding bagian silinder konsentris akan mengalami penurunan massa jenis molekulnya. Akibat pengaruh gaya gravitasi, selanjutnya udara dengan molekul yang lebih ringan akan terangkat ke atas dan menyebabkan terjadinya aliran udara. Aliran udara ini bergerak sambil mengangkut panas pada permukaan dinding sungkup. Bentuk geometri dinding sungkup dan aliran udara yang terjadi dapat dilihat pada Gambar 1. Bagian nomor 9 merupakan geometri sektor ellipsis sungkup yang diteliti.



Gambar 1. Geometri dinding sungkup dan aliran udara yang terjadi[2]

Keterangan gambar:

1. Sistem Pembangkitan Uap Nuklir
2. lubang masukan udara
3. bafel luar (dinding beton)
4. saluran celah luar
5. lubang antar celah
6. bafel dalam (SS 304)
7. saluran celah dalam
8. dinding sungkup bagian sektor ellips (SS 304)
9. dinding sungkup sektor ellips (SS 304)
10. cerobong/lubang keluaran udara

Pada permukaan dinding sungkup, proses perindahan panas terjadi dengan cara konveksi alamiah. Konveksi merupakan proses perpindahan panas dari suatu permukaan benda padat ke suatu fluida di sekitar permukaan tersebut akibat adanya perbedaan temperatur. Konveksi yang terjadi karena adanya gaya apung yang disebabkan oleh perbedaan temperatur disebut sebagai konveksi alamiah. Sedangkan konveksi yang terjadi akibat adanya tambahan gaya eksternal, seperti dari kipas, pompa, maupun hembusan fluida disebut sebagai konveksi paksa[3]. Perpindahan panas pada permukaan dinding sungkup Reaktor AP1000 pada kondisi operasional normal terjadi secara konveksi alamiah. Saluran udara pada celah dalam yang dibatas oleh permukaan dinding sungkup dan bafel dalam membentuk bangun geometri yang konsentris. Karena udara memiliki nilai Prandtl (Pr) pada kisaran 0,7 maka permukaan dinding sungkup dengan bafel dalam dapat diperlakukan atau dianggap sebagai plat vertikal sejajar bila memenuhi persamaan sebagai berikut [4]:

$$\frac{D}{L} \geq \frac{35}{Gr^{*1/4}} \dots\dots\dots (1)$$

dimana,

D : diameter sungkup;

L : lebar celah saluran dalam;  
Gr\* : nilai Grashof termodifikasi.

Untuk geometri plat datar vertikal sejajar, pendekatan korelasi empiris perpindahan panas konveksi yang terjadi dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut[5]:

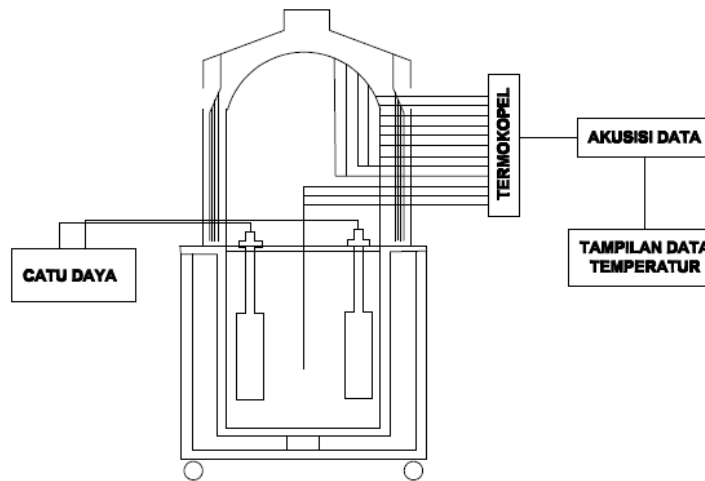
$$Nu_x = \frac{h_x x}{k} = C(Gr^* . Pr)^m \dots\dots\dots (2)$$

dimana,

- Nu<sub>x</sub> : bilangan Nuselt lokal;
- h<sub>x</sub> : koefisien perpindahan pans konveksi lokal;
- x : panjang karakteristik;
- k : koefisien konduksi udara;
- C,m : konstanta; dan
- Pr : bilangan Prandlt.

**Skema Peralatan**

Susunan peralatan model sungkup AP1000 beserta perlengkapan yang dipergunakan untuk meneliti perpindahan panas konveksi yang terjadi pada sektor ellipsdapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2.** Skema pengujian model sungkup AP1000[6]

### 3. Langkah Kerja

Adapun langkah pengujian dan pengambilan data untuk mempelajari karakteristik perpindahan panas pada pendinginan model sungkup AP1000 dengan udara yang bersirkulasi alamiah adalah sebagai berikut:

1. Siapkan peralatan dan perlengkapan percobaan sebagaimana skema pada Gambar 2;
2. Sambungkan termokopel pada masing-masing posisi pengukuran ke sistem akuisisi data;
3. Sambungkan termokopel pemantau temperatur permukaan dinding pemanas ke *datalogger*;
4. Masukkan air ke dalam bejana sebanyak kurang lebih 170 liter;
5. Periksa penunjukan level ketinggian air pada alat ukur;
6. Operasikan alat pengukur tekanan dalam sungkup;
7. Hidupkan sistem pencatu daya;
8. Jalankan pemanas untuk daya awal total sebesar 400 W;
9. Lakukan pencatatan data setiap 5 detik hingga tercapai keadaan *steady state*;
10. Simpan data temperatur yang telah diperoleh dan matikan pemanas;
11. Ulangi percobaan untuk variasi daya pemanas yang lain (10 variasi daya, dari 400 W hingga 8000 W).

#### **Perhitungan Parameter Operasi**

Setelah data temperatur pada permukaan dinding sungkup dan bafel dalam didapatkan, kedua nilai tersebut direratakan sebagai temperatur film. Temperatur film inilah yang selanjutnya dijadikan

nilai dasar untuk penentuan nilai-nilai propertis udara yang berkesesuaian dan dipergunakan untuk menghitung nilai  $k$ , bilangan  $Pr$ ,  $Nu_x$ , dan  $Gr^*$ .

### 4. Hasil dan Pembahasan

Dari hasil pengukuran temperatur pada permukaan sungkup sektor ellips, selanjutnya dibandingkan dengan temperatur aliran udara bebas yang terjadi pada saluran celah dalam di atas sektor ellips. Selisih antara keduanya disebut sebagai temperatur film. Temperatur film selanjutnya dianalisis melalui perhitungan parameter-parameter operasi, akan diketahui besaran-besaran yang menunjukkan propertis udara yang mengalir. Dari hasil analisa propertis udara didapatkan nilai bilangan  $Gr^*$  berada pada kisaran  $1,06 \times 10^6$  s.d.  $1,008 \times 10^{11}$ . Dengan menerapkan rumusan pada Persamaan (2) dimana nilai  $D = 99$  cm dan  $L = 1$  cm, maka:

$$\Leftrightarrow Gr^{0,25} \geq \frac{35L}{D},$$

$$\Leftrightarrow Gr \geq \left(\frac{35L}{D}\right)^4$$

$$\Leftrightarrow Gr \geq \left(\frac{35}{99}\right)^4$$

$$\Leftrightarrow Gr \geq 0,015621812 \dots\dots\dots (3)$$

Dari hasil perhitungan tersebut diketahui bahwa nilai  $Gr$  minimal sebesar 0,015621812.

Karena kisaran  $Gr^*$  hasil perhitungan berdasarkan data pengukuran pada rentang  $1,06 \times 10^6$  s.d.  $1,008 \times 10^{11}$ , maka Persamaan (1) dan (3) terpenuhi sehingga geometri saluran celah udara yang dimaksud dapat dianggap sebagai bidang plat rata sejajar. Selanjutnya untuk merumuskan persamaan korelasi empiris perpindahan panas lokal pada bidang plat sejajar dapat dipergunakan Persamaan (2).

Dengan memplotkan data nilai logaritmik nilai Nusselt lokal ( $Nu_x$ ) terhadap nilai bilangan Rayleigh ( $Ra_x^*$ ), akan diperoleh suatu pendekatan

regresi garis lurus dengan persamaan umumy =  $0,2532x - 0,2388$  sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3.

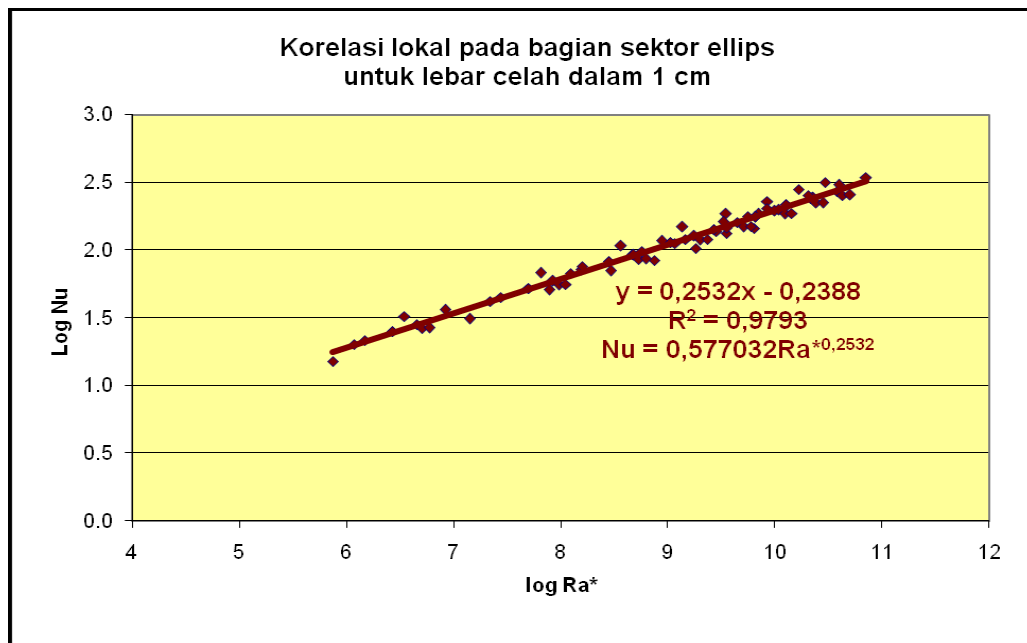
Berdasarkan persamaan tersebut, dapat dirumuskan persamaan garis sebagai berikut:

$$\log Nu_x = 0,2532 \log Ra_x^* - 0,2388$$

$$\Leftrightarrow \log Nu_x = \log Ra_x^{*0,2532} + \log 10^{-0,2388}$$

$$\Leftrightarrow Nu_x = 10^{0,2388} Ra_x^{*0,2532}$$

$$\Leftrightarrow Nu_x = 0,577032 Ra_x^{*0,2532}$$



**Gambar 3.** Persamaan korelasi empiris lokal perpindahan panas pada dinding sungkup sektor ellipsis

Dari analisis statistika terhadap data yang membentuk kurva pada Gambar 5, diperoleh nilai koefisien regresi sebesar 0,9793. Hal ini menunjukkan bahwa data hasil eksperimen berkorelasi dengan tingkat korelasi yang mendekati nilai 1. Nilai ini menunjukkan bahwa persamaan korelasi yang didapatkan secara statistik memiliki nilai keakuratan yang tinggi dan dapat dipercaya sebagai gambaran proses perpindahan panas yang terjadi dalam sistem model sungkup yang diamati.

## 5. Kesimpulan

Dari hasil eksperimen terhadap karakteristik perpindahan panas pada sektor ellips model sungkup AP1000 yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Dalam kondisi kecelakaan berupa aliran fluks panas dari sistem pembangkitan uap nuklir, temperatur pada sektor ellips sungkup masih jauh di bawah temperatur rekristalisasi material sehingga tidak akan menimbulkan deformasi, keretakan, maupun bocoran zat radioaktif ke lingkungan hidup;
2. Berdasarkan rentang nilai bilangan  $Gr^*$  yang didapatkan dari analisis data, geometri sektor ellips dan bafel dalam di atasnya dapat dianggap sebagai dua plat sejajar;
3. Persamaan korelasi empiris perpindahan panas yang terjadi pada sektor ellips yang didapatkan adalah  $Nu_x = 0,577Ra^{*0,2532}$ , berlaku untuk

rentang bilangan Rayleigh  $7,51 \times 10^5 < Ra^* < 7,08 \times 10^{10}$ .

## Daftar Pustaka

- [1]. Hermawan, N.T.E., Penentuan Korelasi Empiris Lokal Perpindahan Panas pada Bagian Silinder Konsentris Model Sungkup AP1000, *Prosiding Kongres Ilmu Pengetahuan Nasional ke-X*, LIPI, Jakarta, 2012;
- [2]. Hermawan, N.T.E., Pasek., A.D., Umar, E., Karakteristik Perpindahan Panas pada Pendinginan Model Sungkup AP1000 dengan Udara yang Bersirkulasi Alamiyah, *Jurnal Teknologi Nasional*, LIPI, Jakarta, 2011;
- [3]. Munson, B.R., Moran, M.J, Shapiro, H.N., Dewwit, D.P., *Introduction to Thermal Systems Engineering: Thermodynamics, Fluid Mechanics, and Heat Transfer*, Jhon Wiley & Sons, Inc., New York, 2003;
- [4]. Gebhart, *Heat Transfer*, 2nd edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1970;
- [5]. Mc Adams, W.H., *Heat Transmission*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1954;
- [6]. Hermawan, N.T.E., *Studi Eksperimental Pengaruh Perubahan Lebar Celah terhadap Karakteristik Perpindahan Panas pada Model Sungkup AP1000*, Tesis Program Magister Ilmu dan Rekayasa Nuklir, Institut Teknologi Bandung, 2011.