

PENYUSUNAN PROGRAM KOMPUTER UNTUK ANALISIS TERMOHIDRAULIK REAKTOR KARTINI

Ma'sum Ischaq, Syarip, Edi Trijono B.S., Suyamto

PPNY BATAN, Jl. Babarsari Kotakpos 1008 Yogyakarta 55010

ABSTRAK

PENYUSUNAN PROGRAM KOMPUTER UNTUK ANALISIS TERMOHIDRAULIK REAKTOR KARTINI. Telah disusun suatu program komputer yang bisa digunakan untuk menghitung suhu di dalam bahan bakar dan teras reaktor. Suhu di dalam bahan bakar dihitung dengan cara eksplisit. Mula-mula disusun persamaan diferensial parsial, suhu sebagai fungsi jari-jari bahan bakar dan waktu, $T = f(r,t)$, lalu persamaan diubah menjadi persamaan beda hingga agar bisa diselesaikan secara numerik menggunakan komputer. Koefisien perpindahan panas konveksi antara bahan bakar dengan fluida pendingin dihitung berdasarkan peristiwa konveksi alamiah, mengikuti persamaan $Nu = f(Gr, Pr)$. Dari program yang dibuat, bisa diramalkan suhu bahan bakar dan suhu teras pada aras daya dan kondisi fluida yang tertentu.

ABSTRACT

THE DEVELOPMENT OF A COMPUTER PROGRAM FOR THERMOHYDRAULIC ANALYSIS OF KARTINI REACTOR. A computer programming that could be used to calculate the fuel temperature and the reactor core, has been developed. The inside fuel temperature was calculated by explicit method. First, the differential partial equations were arranged the temperature as a function of the fuel radius and time, $T = f(r,t)$, and then the equations were transformed into the finite difference equations that could be solved numerically by the computer. The convection heat transfer coefficient between the fuel and the coolant was calculated basically by the free convection phenomena that followed the equation $Nu = f(Gr, Pr)$. By this computer programming, the fuel and the core temperature in a certain condition of the reactor power and the fluid could be predicted.

PENDAHULUAN

Peristiwa perpindahan panas yang terjadi di dalam teras reaktor nuklir adalah akibat dari timbulnya panas dari bahan bakar yang mengalir ke tepi menuju fluida pendingin. Menurut Duderstadt dan Hamilton (1) serta Whitaker (2), perpindahan panas dari bahan bakar ke fluida ini berlangsung secara konveksi, bisa secara alamiah ataupun paksa, tergantung dari sistemnya.

Pada reaktor daya, perpindahan panas antara bahan bakar dengan fluida adalah secara konveksi paksa oleh adanya aliran fluida pendingin melalui sela-sela bahan bakar, koefisien perpindahan panasnya besar, menurut Whitaker (2) dan Holeman (3) ordenya sekitar 250 - 10.000 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$; sedangkan pada reaktor penelitian yang berupa kolam, aliran fluida pendinginnya bisa tidak langsung melalui bahan bakar, sehingga perpindahan panasnya adalah akibat perbedaan suhu antara fluida di dekat bahan bakar dengan

fluida di atas bahan bakar, aliran panas ini secara gaya apung, koefisien konveksinya jauh lebih kecil, yaitu ordenya sekitar 5 - 50 $W/m^2 \text{ } ^\circ C$.

TEORI

Lazimnya, agar persoalan teknik yang relatif rumit bisa diselesaikan, maka menurut Sediawan (4) dan Bendhiyasa (5), mula-mula persoalan tersebut dinyatakan dalam persamaan matematik (misalnya dalam bentuk persamaan diferensial), kemudian persamaan matematik ini diselesaikan.

Penyelesaian persamaan diferensial secara numerik menjadi semakin populer dengan semakin berkembangnya pemakaian komputer untuk perhitungan. Mula-mula persamaan diferensial parsial didekati dengan cara *Finite Difference Approximation* (Pendekatan Beda Hingga) sehingga diperoleh persamaan-persamaan aljabar, lalu diselesaikan secara substitusi atau matriks.

PD Parsial → Persamaan Beda Hingga → Jawaban
($\Delta x, \Delta t \rightarrow 0$) ($\Delta x, \Delta t$ kecil)

Peristiwa perpindahan panas dari bahan bakar ke air pendingin primer bisa digambarkan sebagai berikut :

Arah aliran panas →

b. bakar gap clad air pendingin

Gambar 1. Arah aliran panas di teras reaktor

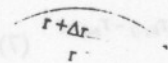
Asumsi-asumsi yang bisa dipakai, menurut Duderstadt (1) adalah sebagai berikut :

1. flux neutron homogen
2. panas hanya dihasilkan dari dalam bahan bakar
3. perpindahan panas hanya terjadi pada arah radial
4. panas yang dibangkitkan masing-masing bahan bakar sama jumlahnya dan merata di setiap posisi

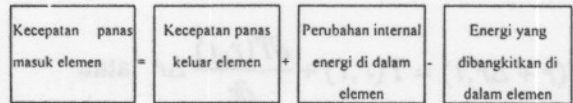
TATA KERJA

a. Penyusunan persamaan matematik

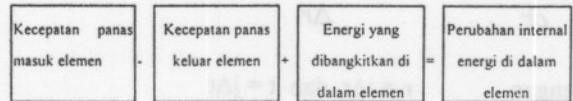
Ditinjau elemen volum bahan bakar arah radial setebal Δr , maka bisa disusun neraca panas pada elemen volum tersebut selama Δt adalah sebagai berikut :



R



atau



sehingga bisa diperoleh persamaan diferensial parsial untuk konduksi arah radial sebagai berikut :

$$[q_{r, (2\pi r L) \Delta t} - q_{r+\Delta r, (2\pi r L) \Delta t}] + q''' (2\pi \Delta r L) \Delta t = 2\pi \Delta r L \rho c (T_{r+\Delta r} - T_r)$$

dibagi : $2\pi \Delta r L \Delta t$
dengan Δt dan $\Delta r \rightarrow 0$

$$-\frac{\partial q}{\partial r} + q''' = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}$$

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial r}$$

jika disubstitusikan : $\frac{\partial T}{\partial r}$, maka :

$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{q'''}{k} = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

jika dituliskan dalam persamaan beda hingga, diperoleh :

$$\frac{T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}}{(\Delta r)^2} + \frac{1}{i(\Delta r)} \frac{T_{i-1,j} - T_{i,j}}{\Delta r} + \frac{q'''}{k} = \frac{\rho c}{k} \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t}$$

$$T_{i,j+1} = \frac{(1 + \frac{1}{i})T_{i+1,j} + (M - 2 - \frac{1}{i})T_{i,j} + T_{i,j-1} + \frac{q'''\Delta t}{\rho c}}{M} \quad (2)$$

$$\text{dengan : } M = \frac{\rho c (\Delta r)^2}{k \Delta t} \quad (3)$$

Penyusunan PBH (persamaan beda hingga) adalah sbb:

Ekspansi deret Taylor dari $T(r,t)$ ke r :

$$T(r + \Delta r, t) = T(r, t) + \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \Delta r + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} (\Delta r)^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 T(r, t)}{\partial r^3} (\Delta r)^3 + \dots$$

dengan mengabaikan suku ketiga dst, maka diperoleh persamaan :

$$T(r + \Delta r, t) = T(r, t) + \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \Delta r \quad \text{atau}$$

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = \frac{T(r + \Delta r, t) - T(r, t)}{\Delta r}$$

dengan $r = i\Delta r$ dan $t = j\Delta t$

sehingga : $T(r, t) = T_{i,j}$

$$T(r + \Delta r, t) = T_{i+1,j}$$

Persamaan di atas dituliskan menjadi :

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial r} = \frac{T_{i+1,j} - T_{i,j}}{\Delta r}$$

Analog, bisa disusun persamaan :

$$\frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \frac{T_{i,j+1} - T_{i,j}}{\Delta t}$$

Turunan kedua bisa dicari dengan deret Taylor juga, sbb :

$$T(r + \Delta r, t) = T(r, t) + \frac{1}{1!} \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \Delta r + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} (\Delta r)^2 + \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 T(r, t)}{\partial r^3} (\Delta r)^3 + \dots$$

$$T(r - \Delta r, t) = T(r, t) - \frac{1}{1!} \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \Delta r + \frac{1}{2!} \frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} (\Delta r)^2 - \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 T(r, t)}{\partial r^3} (\Delta r)^3 + \dots$$

jika digabungkan kedua persamaan tersebut dan suku kelima dst. diabaikan, maka bisa diperoleh persamaan berikut :

$$T(r + \Delta r, t) + T(r - \Delta r, t) = 2T(r, t) + \frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} (\Delta r)^2$$

$$\text{atau} : \frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} = \frac{T(r - \Delta r, t) - 2T(r, t) + T(r + \Delta r, t)}{(\Delta r)^2}$$

Dengan notasi beda hingga diperoleh PBH :

$$\frac{\partial^2 T(r, t)}{\partial r^2} = \frac{T_{i-1,j} - 2T_{i,j} + T_{i+1,j}}{(\Delta r)^2}$$

Kondisi batas 1 : Keadaan di pusat silinder

$$\text{pada } r = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial r} = 0, \quad \text{sehingga} \quad \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

Agar bisa diselesaikan, maka :

$$\lim_{r \rightarrow 0} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \lim_{r \rightarrow 0} \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] = \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \Big|_{r=0}$$

$$\left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=0} = 2 \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right)_{r=0}$$

Untuk $r = 0$, maka persamaan (1) bisa dituliskan menjadi :

$$2 \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{q'''}{k} = \frac{\rho c}{k} \frac{\partial T}{\partial t}$$

atau

$$2 \frac{T_{-1,j} - 2T_{0,j} + T_{1,j}}{(\Delta r)^2} + \frac{q'''}{k} = \frac{\rho c}{k} \frac{T_{0,j+1} - T_{0,j}}{\Delta t}$$

Karena simetri, maka $T_{-1,j} = T_{1,j}$, sehingga persamaan di atas menjadi :

$$T_{0,j+1} = \left(1 - \frac{4}{M}\right) T_{0,j} + \frac{4}{M} T_{1,j} + \frac{q''' \Delta t}{\rho c} \quad (4)$$

Kondisi batas 2 : perpindahan panas antara bahan bakar dengan gap (rongga yang berisi gas).

Terjadi perpindahan panas secara konduksi & konveksi, yang bisa disederhanakan dengan memakai konduktivitas termal dari gas (k_{gap}), dikenal dengan nama : korelasi Ross dan Stout, sehingga bisa disusun persamaan berikut :

$$q = - \frac{k_{gap} \pi (R_f + d_{gap})^2}{d_{gap}} \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$q = \frac{k_{gap} \pi (R_f + d_{gap})^2}{d_{gap}} \frac{T_{R_f-j} - T_{gap,j}}{\Delta t} \quad (5)$$

Kondisi batas 3 : terjadi perpindahan panas secara konduksi dari gap ke kelongsong bahan bakar, persamaannya adalah sbb :

$$q = - \frac{k_{clad} \pi (R_f + d_{clad})^2}{d_{clad}} \frac{\Delta T}{\Delta t}$$

$$T_{clad,j} = T_{gap,j} - \frac{q d_{clad} \Delta t}{k_{clad} \pi (R_f + d_{clad})^2} \quad (6)$$

Substitusikan q dari persamaan 5, maka diperoleh persamaan berikut :

$$T_{clad,j} = T_{gap,j} - \frac{k_{gap} d_{clad}}{d_{gap} k_{clad}} \left(\frac{R_f + d_{gap}}{R_f + d_{clad}} \right)^2 (T_{R_f,j} - T_{gap,j}) \quad (7)$$

Kondisi batas 4 : permukaan benda bersentuhan dengan cairan yang suhunya tetap, persamaan neraca panasnya adalah sbb :

$$- \frac{k_{clad} A}{d_{clad}} \frac{\Delta T}{\Delta t} = h_{conv} A \frac{T_{clad,j} - T_a}{\Delta t}$$

$$T_{gap,j} = T_{clad,j} + \frac{h_{conv} d_{clad}}{k_{clad}} (T_{clad,j} - T_a) \quad (8)$$

Substitusikan $T_{clad,j}$ dari persamaan 7, maka diperoleh persamaan :

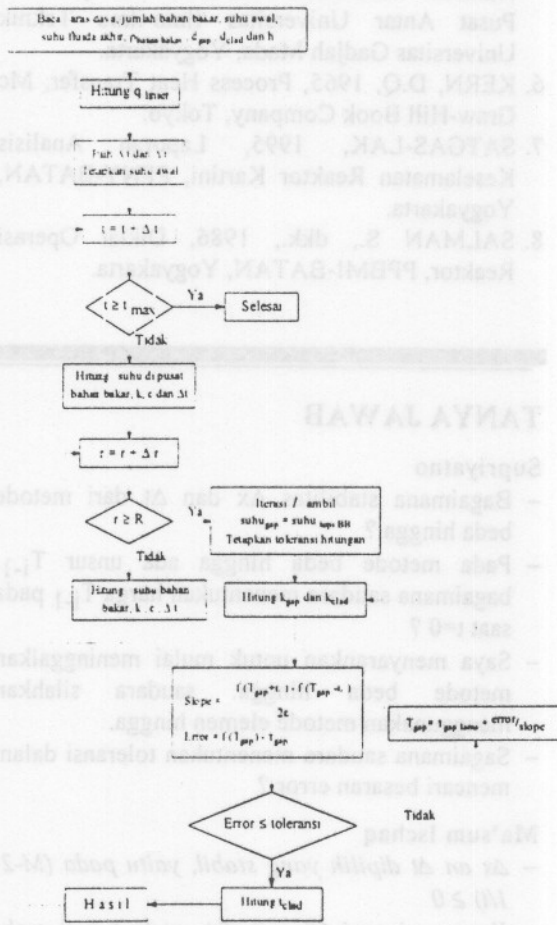
$$T_{gap,j} = T_{gap,i} - \frac{k_{gap} d_{clad}}{d_{gap} k_{clad}} \left(\frac{R_f + d_{gap}}{R_f - d_{clad}} \right) (T_{R,i} - T_{gap,i}) + \frac{h_{conv} d_{clad}}{k_{clad}} \left[\left\{ T_{gap,i} - \frac{k_{gap} d_{clad}}{d_{gap} k_{clad}} \left(\frac{R_f + d_{gap}}{R_f - d_{clad}} \right) (T_{R,i} - T_{gap,i}) \right\} - T_a \right]$$

Sehingga bisa dihitung $T_{gap,j}$ dari persamaan berikut ini :

$$T_{gap,j} = \left(\frac{1}{h_{conv}} + \frac{d_{clad}}{k_{clad}} \right) \left[\frac{k_{gap}}{d_{gap}} \left(\frac{R_f + d_{gap}}{R_f - d_{clad}} \right) (T_{R,i} - T_{gap,i}) - T_a \right] \quad (9)$$

b. Penyusunan program komputer

Dari persamaan-persamaan beda hingga tadi, bisa disusun diagram alir untuk perhitungan komputer seperti terlukis pada gambar 2 dan dituliskan didalam bahasa Basic seperti tertera di dalam lampiran.



Gambar 2. Diagram alir program perhitungan termohidraulik

Untuk menghitung koefisien perpindahan panas konveksi digunakan persamaan dari Holeman (4) dan Whitaker (3):

$$Nu = C (Gr \cdot Pr)^{0,25} \quad (10)$$

dengan :

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad \text{bilangan Nusselt}$$

$$Gr = \frac{\beta(T_0 - T_\infty)gL^3}{\nu^2} \quad \text{bilangan Grashof}$$

$$Pr = \frac{c_p \mu}{k} \quad \text{bilangan Prandtl}$$

Sedangkan C, adalah tetapan yang nilainya tergantung dari nilai Pr seperti ditulis oleh Whitaker (3) dan Kern (6) :

Tabel 1. Hubungan antara nilai C dengan Pr

Pr	0	0,01	0,72	1,0	10	100
C	0	0,242	0,516	0,535	0,620	0,653

HASIL DAN PEMBAHASAN

Program tersebut jika dieksekusi dengan memasukkan data-data dari Laporan Analisis Keselamatan Reaktor (7) dan Diktat Kursus Operator Reaktor (8) berikut :

Aras daya (q) = 100 kW, jumlah bahan bakar = 68, suhu awal = 30°C, suhu akhir pendingin di dekat bahan bakar = 48°C, suhu air pendingin di bejana = 36°C, berat jenis bahan bakar = 5,99 g/cm³, tebal gap = 0,0635 cm, tebal kelongsong = 0,051 cm.

Hasilnya disusun pada tabel 2 dan dilukiskan pada gambar 3, keadaan tunak dicapai setelah waktu operasi sekitar 32,61 menit dan suhu pusat bahan bakar 172,5°C. Pengujian program pada aras daya 0 kW dan pada kondisi tanpa pendinginan (100 kW) dituliskan pada lampiran 2.

Nilai koefisien perpindahan panas konveksi dihitung dari persamaan 10 pada kisaran Pr antara 5,56 - 4,16; Gr antara 0,3432 - 0,4289, maka diperoleh h_{conv} antara 0,43 sampai 0,60 kal/(det.cm².K), masih masuk di dalam kisaran

perpindahan panas secara konveksi alamiah (yaitu 1,2 - 12,1).

Tabel 2. Suhu bahan bakar sebagai fungsi dari jarak dan waktu

Suhu (°C) bahan bakar pada jarak (cm) dari pusat.

t, menit	0.00	0.22	0.45	0.67	0.89	1.12	1.34	1.57	1.79	Gap	Clad
0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0
2.24	59.8	60.3	60.3	59.6	58.1	55.6	52.0	46.9	40.3	32.0	32.0
3.29	84.6	84.9	84.0	81.4	77.3	71.6	64.3	55.4	45.0	32.9	33.0
4.33	102.5	102.6	101.0	97.1	91.0	83.0	73.2	61.6	48.4	33.8	33.9
5.36	115.5	115.5	113.4	108.5	101.1	91.4	79.7	66.2	51.2	34.8	34.8
6.39	125.1	125.0	122.6	117.1	108.7	97.8	84.8	69.9	53.4	35.7	35.7
7.41	132.4	132.3	129.6	123.6	114.5	102.7	88.7	72.8	55.3	36.6	36.7
8.43	138.1	137.9	135.1	128.6	119.0	106.6	91.9	75.2	57.0	37.5	37.6
10.46	146.2	146.0	143.0	136.0	125.7	112.5	96.7	79.0	59.8	39.4	39.4
11.48	149.3	149.1	145.9	138.9	128.3	114.7	98.7	80.7	61.0	40.3	40.3
13.51	154.3	154.0	150.8	143.5	132.6	118.6	102.1	83.5	63.4	42.1	42.2
14.52	156.4	156.2	152.9	145.5	134.5	120.4	103.6	84.9	64.5	43.0	43.1
15.54	158.4	158.1	154.9	147.4	136.3	122.0	105.1	86.1	65.6	43.9	44.0
16.55	160.3	160.0	156.7	149.2	137.9	123.5	106.5	87.4	66.7	44.8	44.9
17.56	162.1	161.8	158.5	150.9	139.6	125.0	107.9	88.6	67.8	45.8	45.8
18.58	163.8	163.6	160.2	152.6	141.1	126.5	109.2	89.8	68.8	46.7	46.7
19.59	165.5	165.3	161.9	154.2	142.7	128.0	110.6	91.0	69.9	47.6	47.6
20.60	167.2	166.9	163.6	155.8	144.2	129.4	111.8	92.0	70.6	48.0	48.0
21.60	168.7	168.4	165.0	157.1	145.4	130.3	112.5	92.5	70.9	48.0	48.0
32.61	172.5	172.2	168.6	160.5	148.3	132.7	114.3	93.7	71.4	48.0	48.0
59.61	172.6	172.3	168.7	160.6	148.4	132.8	114.4	93.7	71.5	48.0	48.0



Gambar 3. Distribusi suhu di dalam bahan bakar pada pelbagai posisi sebagai fungsi waktu (100 kW)

KESIMPULAN

Dari penelitian ini bisa ditarik kesimpulan bahwa suhu di dalam bahan bakar arah radial sebagai fungsi dari aras daya bisa diperhitungkan menggunakan program yang dibuat, sedangkan suhu di dalam teras reaktor bisa dihitung menggunakan persamaan pendekatan sesuai

dengan sifat perpindahan panasnya, yaitu konveksi bebas, yang dipilih.

DAFTAR PUSTAKA

1. DUDERSTADT, J.J. AND HAMILTON, L.J., 1976, Nuclear Reactor Analysis, John Wiley & Sons Inc., New York.
2. WHITAKER, S., 1977, Fundamental Principles of Heat Transfer, Pergamon Press Inc., New York.
3. HOLEMAN, J.P., 1963, Heat Transfer, 4th ed., McGraw-Hill Book Company, New York.
4. SEDIAWAN, W.B., 1989, Penyelesaian Numeris Persamaan Konduksi Unsteady State, Pusat Antar Universitas Ilmu-ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
5. BENDHIYASA, I.M., 1989, Penyelesaian Numeris Persamaan Konduksi Steady State, Pusat Antar Universitas Ilmu-ilmu Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta.
6. KERN, D.Q, 1965, Process Heat Transfer, Mc Graw-Hill Book Company, Tokyo.
7. SATGAS-LAK, 1995, Laporan Analisis Keselamatan Reaktor Kartini, PPNY-BATAN, Yogyakarta.
8. SALMAN S., dkk., 1986, Diklat Operasi Reaktor, PPBMI-BATAN, Yogyakarta.

TANYA JAWAB

Supriyatno

- Bagaimana stabilitas Δx dan Δt dari metode beda hingga ?
- Pada metode beda hingga ada unsur T_{i-1} , bagaimana saudara menentukan harga T_{i-1} pada saat $t=0$?
- Saya menyarankan untuk mulai meninggalkan metode beda hingga. saudara silahkan menggunakan metode elemen hingga.
- Bagaimana saudara menentukan toleransi dalam mencari besaran error ?

Ma'sum Ischaq

- Δx an Δt dipilih yang stabil, yaitu pada $(M-1/i) \geq 0$
- Karena simetri ($T_{i-1} = T_j$), pada $t = 0$ maka $T_{i-1,0} = T_{i,0}$
- Saran dipertimbangkan.

- Toleransi adalah nilai tertinggi yang merupakan selisih nilai terhitung dengan sebelumnya yang masih bisa diterima. $Error \leq toleransi$.

Herry Purnomo

- Berapa kisaran aliran fluida pendingin yang masih berlaku untuk model matematis yang disusun ?
- Bagaimana memprediksi bahwa *forced convection* diabaikan ?
- Dengan metoda apa iterasi dilakukan thd. h ?

Ma'sum Ischaq

- Model berlaku untuk perpindahan panas konveksi alamiah, tidak dipengaruhi secara langsung oleh kecepatan aliran fluida.
- Dengan nalar, fluida mengalir melalui celah-celah bahan bakar bukan oleh paksaan.
- h dihitung dari persamaan 10, jika tidak sesuai diulang lagi. jadi dengan cara substitusi langsung.

Amir Hamzah

- Apakah hasil perhitungan yang bapak lakukan telah dibandingkan dengan perhitungan program lain atau hasil pengukuran ?

Jawab

- Belum dibandingkan dengan program lain, tetapi dibandingkan dengan hasil pengukuran parameter operasi reaktor Kartini.

Heryudo Kusumo

- Apakah hasil perhitungan suhu bahan bakar dengan program komputer ini telah diverifikasi melalui eksperimen ?
- Apakah telah diperhitungkan pengaruh lokasi bahan bakar dalam teras reaktor (misalnya pada ring yang berlainan, dekat batang kendali, dll) dan pengaruh burn-up bahan bakar terhadap hasil perhitungan suhu bahan bakar ?

Ma'sum Ischaq

- Sudah dibandingkan dengan kondisi operasi reaktor Kartini.
- Pengaruh lokasi bahan bakar dan burn-up diabaikan.

LAMPIRAN I :

PROGRAM KOMPUTER UNTUK MENGHITUNG SUHU TERAS REAKTOR KARTINI

5 INPUT "Isikan : 1 Dengan pendinginan 2. Tanpa pendinginan = ", dp

```
6 n3 = 30 'Penulisan hasil hitungan setiap n3 data
8 nm = 60 'Waktu diubah dari detik menjadi menit
10 'Dimensi dan sifat-sifat fisik dari teras :
12 dgap = .0635 'Tebal gap (cm)
14 dclad = .051 'Tebal clad (cm)
16 jumlb = 68: d = 3.58: l = 38.5 'd (diameter, cm), l
   (panjang, cm)
18 jari = d / 2 'Jari-jari bahan bakar (cm)
20 pi = ATN(1) * 4
22 vol = pi / 4 * d ^ 2 * l 'volum (cm3)
24 daya = 100 'Aras daya reaktor (kW)
26 q = daya * 1000 / 4.185 / jumlb / vol 'Panas yang
   dibangkitkan dalam kal/cm3
28 tawal = 303 'Suhu awal (K)
30 tfluida = 321 'Suhu fluida (K) akhir
31 IF daya <= 0 THEN tfluida = 303
33 IF daya > 100 THEN tf = 30 + .1922238 * daya -
   1.222237E-04 * daya * daya: tfluida = tf + 273
35 IF daya > 100 THEN tfluida = 373
32 RHO = 5.99 'Rapat massa bahan bakar (g/cm3)
34 ah = .43 'Heat transfer coefficient (cal/detik/cm2/K)
36 PRINT : IMAXT = 1200 'Jumlah interval waktu
38 n = 8 'Jumlah interval panjang
40 DELX = jari / n: AM = 3
44 Tsub = tawal
46 DIM temp(n + 2), tbaru(n + 2)
48 GOSUB 272
50 DEF fna (tgap) = s1 * s2 * (tbaru(n) - tgap) + tfluid
52 REM Set suhu awal
54 itime = 0
56 FOR I = 0 TO n + 2
58   temp(I) = tawal : NEXT I
62 TIME = 0
68 PRINT TAB(14); "Suhu (°C) pada jarak (cm) dari pusat"
70 PRINT "t, menit"; : PRINT TAB(10);
72 FOR IX = 0 TO jari STEP DELX: PRINT USING "###.## ";
   IX; : NEXT: PRINT " Gap Clad"
74 FOR I = 1 TO 74: PRINT "-."; : NEXT
76 PRINT : PRINT TAB(5); TIME; : PRINT TAB(9);
78 FOR I = 0 TO n + 2
80   PRINT USING "####.#"; temp(I) - 273; NEXT I
84 REM perhitungan dimulai; n1 = n - 1
88 FOR itime = 1 TO IMAXT: n2 = n2 + 1
90   IF n2 < n3 THEN 94
92   PRINT : PRINT USING "###.##"; (itime + delt) / nm; :
   PRINT TAB(9);
94   tbaru(0) = (1 - 4 / AM) * temp(0) + 4 / AM * temp(1) + q
   * delt / RHO / AC
96   IF n2 < n3 THEN 100
98   PRINT USING "####.#"; tbaru(0) - 273;
100  FOR I = 1 TO n
```

```

102 tbaru(l) = (temp(l - 1) + (AM - 2 - DELX / jari) *
temp(l) + (1 + DELX / jari) * temp(l + 1) + DELX ^ 2 * q *
AM / AK) / AM
104 Tsub = tbaru(l): GOSUB 272
106 IF n2 < n3 THEN 110
108 PRINT USING "####.#"; tbaru(l) - 273; 110 NEXT l
111 IF dp > 1 THEN 249
112 'Iterasi suhu gap dengan cara Newton Raphson
114 epsilon = 1: tol = .1
116 tgap = temp(n + 1) 'Iterasi pertama
218 GOSUB 240
220 tfluid = (tfluida - tawal) * (itime + deltt) / nm / 20 + tawal
'steady state=20 menit
222 IF tfluid >= tfluida THEN tfluid = tfluida
224 Tplus = fna(tgap + epsilon)
226 Tmin = fna(tgap - epsilon)
228 slope = (Tplus + Tmin) / 2 / epsilon
230 errorf = fna(tgap) - tgap
232 tgap = tgap + 100 * errorf / slope
234 IF errorf > tol THEN 218
236 tbaru(n + 1) = tgap: temp(n + 1) = tgap: GOTO 248
238 'Subroutine iterasi N-R
240 kgap = (.0000786 * tgap ^ .77) / 2903
242 kclad = (7.860874 + .003260865# * (tgap - 5)) / 2903
244 s1 = 1 / ah + dclad / kclad: s2 = kgap / dgap * ((jari +
dgap) / (jari + dclad)) ^ 2
246 RETURN
248 s3 = ah * dclad / kclad
249 IF dp > 1 THEN tbaru(n + 1) = tbaru(n)
250 tbaru(n + 2) = (tgap + s3 * tfluid) / (1 + s3)
251 IF dp > 1 THEN tbaru(n + 2) = tbaru(n)
252 IF n2 < n3 THEN 256
254 PRINT USING "####.#"; tbaru(n + 1) - 273; tbaru(n +
2) - 273;
n2 = 0: PRINT #1, USING "####.#"; tbaru(n + 1) - 273;
tbaru(n + 2) - 273;
256 itime = itime + 1
258 TIME = deltt * itime
260 FOR l = 0 TO n + 2
262 temp(l) = tbaru(l)
264 NEXT l
266 NEXT itime
268 END
270 'Subroutine perubahan sifat-sifat fisik akibat perubahan
suhu
272 AK = (52.2596 - .1504727 * Tsub + 1.25566E-04 * Tsub
^ 2) / 418.4
274 AC = (.00208 * Tsub ^ 2 + 2.04 * Tsub - 52.2) / RHO /
4.1868
276 AN = ah * DELX / AK
278 deltt = RHO * AC * DELX ^ 2 / AK / AM
280 RETURN

```

LAMPIRAN 2 : Hasil pengujian program

A. Aras daya 0 kW

Suhu (°C) pada jarak (cm) dari pusat

t, menit	0.00	0.22	0.45	0.67	0.89	1.12	1.34	1.57	1.79	Gap	Clad
0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
2.14	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
4.14	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
6.14	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
8.14	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
10.14	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
12.14	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
14.14	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
16.14	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
18.14	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
20.14	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
21.14	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30

B. Aras daya 100 kW, tanpa pendinginan

Suhu (°C) pada jarak (cm) dari pusat

t, mnt	0.00	0.22	0.45	0.67	0.89	1.12	1.34	1.57	1.79	Gap	Clad
0	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
2.49	61.5	62.1	62.6	62.9	63.1	63.3	63.4	63.5	63.5	63.5	63.5
4.03	99.5	100.2	100.8	101.2	101.5	101.8	102	102.1	102.1	102.1	102.1
5.87	144.9	145.7	146.3	146.9	147.3	147.6	147.8	148	148.1	148.1	148.1
8.21	200.3	201.3	202.1	202.8	203.3	203.7	204	204.2	204.2	204.2	204.2
11.12	268.3	269.5	270.5	271.3	271.9	272.4	272.7	273	273.1	273.1	273.1
14.9	419	420.1	421.1	421.8	422.4	422.8	423.1	423.3	423.4	423.4	423.4
16.43	607	607.6	608	608.4	608.7	608.9	609	609.1	609.2	609.2	609.2
23.51	804.1	804.3	804.6	804.7	804.9	805	805	805.1	805.1	805.1	805.1
40.52	1007	1007	1008	1008	1008	1008	1008	1008	1008	1008	1008
53.22	1106	1106	1106	1106	1106	1106	1106	1106	1106	1106	1106
68.99	1202	1202	1202	1202	1202	1202	1202	1202	1203	1203	1203
88.81	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300	1300
100.73	1351	1351	1351	1351	1351	1351	1351	1351	1351	1351	1351
101.73	1355	1355	1355	1355	1355	1355	1355	1355	1355	1355	1355
102.72	1359	1359	1359	1359	1359	1359	1359	1359	1359	1359	1359
103.71	1363	1363	1363	1363	1363	1363	1363	1363	1363	1363	1363
104.71	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367	1367