

STUDI PENDAHULUAN DALAM PEMBUATAN MODEL ALIRAN AIR PENDINGIN TERAS REAKTOR TRIGA MARK II

B. Soekodijat, Henky P.R.

Pusat Penelitian Teknik Nuklir - Badan Tenaga Atom Nasional

ABSTRAK

PEMBUATAN MODEL ALIRAN AIR PENDINGIN TERAS REAKTOR TRIGA MARK II. Keselamatan suatu reaktor nuklir, baik reaktor daya maupun reaktor penelitian sangat tergantung pada proses perpindahan panas dari teras reaktor ke sistem pendinginnya. Dalam penelitian ini dilakukan pembuatan model matematis perhitungan kecepatan aliran dan suhu air pendingin dalam teras TRIGA MARK II Bandung. Hal ini dilakukan mengingat data-data termohidrolika untuk teras reaktor TRIGA Bandung sulit diperoleh jika hanya dari data eksperimen (sarana pengukurannya terbatas). Oleh karena itu perlu dilaksanakan penggabungan antara eksperimen dan perhitungan, untuk memperoleh data-data termohidrolika teras reaktor. Eksperimen dilakukan untuk memperoleh data suhu elemen bakar dan suhu air di dekat elemen bakar yang ditinjau serta suhu air pendingin masuk dan ke luar tangki reaktor. Suhu elemen bakar diukur dengan Instrumented Fuel Element (IFE), sedang suhu air diukur menggunakan termokopel fluida. Dengan penyelesaian persamaan model aliran ini diperoleh distribusi suhu dan distribusi kecepatan aliran air pendingin dalam teras. Hasil distribusi suhu dan kecepatan aliran air pendingin ini dapat digunakan untuk membantu penelitian termohidrolika yang lain.

ABSTRACT

PRELIMINARY STUDY ON THE CONTRUCTION OF COOLING WATER FLOW MODEL IN TRIGA MARK II REACTOR CORE. The safety of nuclear reactor as power reactor or research reactor depends on the heat transfer process from the reactor core to the cooling system. In this present study, the mathematical model of the velocity and temperature calculation of the cooling water flow in the core of TRIGA MARK II - Bandung is constructed. That work was carried out because of the difficulty in getting the thermohydraulics data in reator core of TRIGA - Bandung if it is only done on the experimental data (the measurement instrumentation is limited). Therefore it is necessary to combine both the experimental and caculation data in order to obtain the thermohydraulics data of the reactor core. The experiment was performed to get temperatures of: the fuel element, the water surrounding of the fuel element and the water from the inlet and outlet of the reactor core. The fuel element and the water temperatures were measured by Instrumented Fuel Element (IFE) and fluid thermocouple respectively. By solving the equations of this flow model, the temperature and the velocity distributions of the cooling water in the core can be obtained. The result of the temperature distribution and the water flow velocity can be used to assist the other thermohydraulics researches.

PENDAHULUAN

Dalam reaktor TRIGA MARK II, Bandung, panas yang dibangkitkan dalam bahan bakar harus dipindahkan ke air pendingin. Laju pembangkitan panas sebanding dengan fluks neutron sedangkan fluks neutron bervariasi harganya, baik ke arah radial maupun ke arah aksial dalam teras reaktor. Maka laju pembangkitan panas dalam elemen bakar akan tergantung pada kedudukan elemen bakar dalam teras dan juga akan bervariasi ke arah aksial dari masing-masing elemen bakar.

Proses perpindahan panas yang terjadi di dalam teras reaktor berlangsung dari elemen

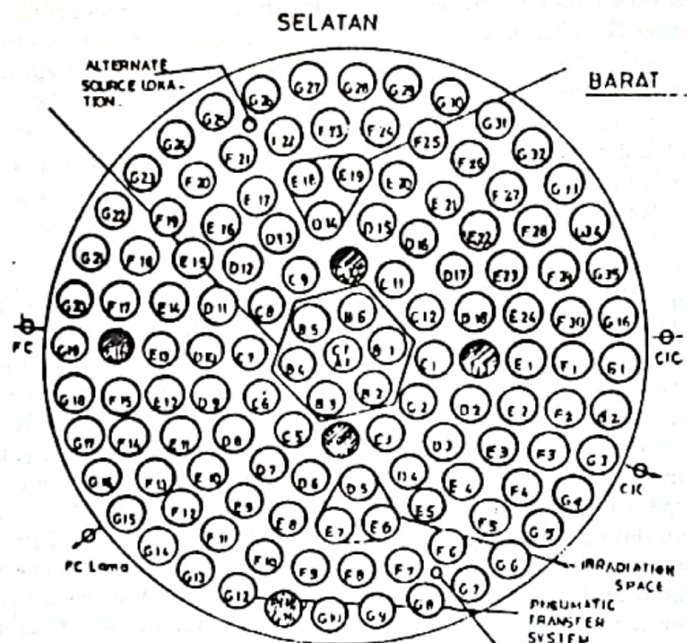
bakar ke air pendingin melalui 2 macam cara perpindahan panas yaitu :

- Perpindahan panas konduksi dalam bahan bakar (pelet) uranium dan kelongsong *stainless-steel* 304.
- Perpindahan panas konveksi dari dinding elemen bakar ke air pendingin. Dalam teras reaktor TRIGA MARK II, perpindahan panas konveksi yang terjadi adalah konveksi alamiah.

Teras reaktor terdiri dari susunan batang-batang elemen bakar silinder yang membentuk ring-ring konsentris (lihat Gambar 1). Adapun

letak satu elemen bakar terhadap elemen-elemen bakar di sekelilingnya tidak teratur dan sangat berdekatan, sedang kanal-kanal air yang terbentuk dapat berupa segitiga atau segiempat, dengan sisi-sisi atau sudut-sudut yang tidak teratur. Di samping itu, karena adanya *grid plate* pada bagian atas teras reaktor maka sulit dilakukan pengukuran, baik pengukuran suhu maupun pengukuran kecepatan aliran air di antara elemen-elemen bakar. Untuk menganalisis aliran air pendingin dalam teras ini maka perlu dibuat suatu model matematis aliran dalam teras. Dengan diperolehnya suatu model matematis, maka akan dapat ditentukan distribusi suhu dan distribusi kecepatan aliran air pendingin.

- elemen bakar adalah daya reaktor dibagi jumlah elemen bakar yang ada di dalam teras.
1. Pada sebuah elemen bakar (yang berbentuk silinder), sumber panas dianggap terletak pada sumbu vertikal elemen bakar.
 2. Dalam satu elemen bakar, distribusi daya dalam arah aksial berbentuk fungsi cosinus.
 3. Celah (gap) antara pelet uranium dan kelongsong SS-304 dalam elemen bakar diabaikan.
 4. Sumber panas dianggap hanya berasal dari satu elemen bakar yang ditinjau, sedang pengaruh panas yang dihasilkan oleh elemen bakar di sekitarnya dianggap tidak ada.
 5. Diameter hidrolis kanal air di antara elemen bakar adalah daya reaktor dibagi jumlah elemen bakar yang ada di dalam teras.



Gambar 1. Diagram teras reaktor TRIGA MARK II

Dalam penelitian ini eksperimen dilakukan untuk memperoleh data suhu elemen bakar dan suhu air pendingin masuk dan keluar tangki reaktor. Suhu elemen bakar diukur dengan menggunakan Instrumented Fuel Element (IFE), sedang suhu air pendingin diukur menggunakan termokopel fluida. Kemudian data-data hasil pengukuran suhu tersebut dimasukkan sebagai syarat-syarat awal untuk menyelesaikan persamaan model matematis secara numerik.

Dalam penyelesaian persamaan model matematis ini diambil beberapa asumsi :

1. Daya reaktor dianggap terdistribusi sama pada setiap elemen bakar, yaitu daya sebuah

men-elemen bakar diambil/diwakili oleh diameter hidrolis di antara 3 elemen bakar yang membentuk segitiga samasisi dan di antara satu elemen bakar dengan elemen bakar lain mempunyai jarak/celah 1 mm.

TEORI

Proses perpindahan panas yang berlangsung dari elemen bakar ke air pendingin teras reaktor terdiri atas :

1. Konduksi dalam pelet uranium,
2. Konduksi dalam kelongsong SS-304,
3. Konveksi alamiah dari dinding luar kelongsong ke air pendingin.

Konduksi dalam pelet uranium

Perpindahan panas konduksi dalam bahan bakar (pelet) uranium dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial parsial:

$$\rho c_p \frac{\delta T}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} \left[k \frac{\delta T}{\delta x} \right] + \frac{\delta}{\delta y} \left[k \frac{\delta T}{\delta y} \right] + \frac{\delta}{\delta z} \left[k \frac{\delta T}{\delta z} \right] + q''' \quad (1)$$

T = suhu [°C], t = waktu [detik], x = arah aksial (vertikal), (jarak posisi yang ditinjau, diukur dari bagian bawah elemen bakar) [meter], y dan z = arah radial (horisontal) (jarak posisi yang ditinjau, diukur dari bagian tengah elemen bakar) [meter], ρ = rapat massa (densitas) pelet uranium [kg/m³], c_p = panas jenis pelet uranium pada tekanan konstan [kJ/kg°C], k = konduktivitas panas uranium [W/m°C], ρ, c_p dan k adalah besaran- besaran yang merupakan fungsi suhu (T), q''' = panas yang timbul dalam satu elemen bakar/satuan volume [W/m³].

dengan : $q''' = q'''_{maks} \sin \left[\frac{\pi x}{L} \right]$ (2)

q'''_{maks} = panas maksimum yang timbul dalam satu elemen bakar/ satuan volume [W/m³], L = panjang elemen bakar [meter].

Karena diameter elemen bakar (D) << panjang elemen bakar (L) maka arah aliran panas konduksi dalam elemen bakar hanya dalam arah radial saja (arah horisontal = arah y dan z), sedang aliran panas konduksi dalam arah aksial (arah vertikal = arah x) sangat kecil yang dapat diabaikan. Karena elemen bakar berbentuk silinder, jika sumber panas terletak pada sumbu berarti aliran panas ke arah y = aliran panas ke arah z. Jadi persamaan (1) dapat disederhanakan menjadi :

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} + \frac{q'''_{maks}}{\rho c_p} \sin \left[\frac{\pi x}{L} \right] \quad (3)$$

atau

$$\frac{\delta (T - T_\infty)}{\delta t} = \alpha \frac{\delta^2 (T - T_\infty)}{\delta y^2} + \frac{q'''_{maks}}{\rho c_p} \sin \left[\frac{\pi x}{L} \right] \quad (4)$$

α = difusivitas termal uranium [m²/detik].

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (5)$$

T_∞ = suhu air dalam aliran bebas [°C].

Substitusi variabel- variabel tanpa dimensi :

$$T^* = \frac{(T - T_\infty)}{(T_0 - T_\infty)} \longrightarrow$$

$$T - T_\infty = T^* (T_0 - T_\infty)$$

$$\delta (T - T_\infty) = (T_0 - T_\infty) \delta T^*$$

$$\delta^2 (T - T_\infty) = (T_0 - T_\infty) \delta^2 T^*$$

$$\tau^* = \frac{t U_\infty}{L} \longrightarrow \tau = \frac{L}{U_\infty} \tau^* \longrightarrow \delta t = \frac{L}{U_\infty} \delta \tau^*$$

$$X^* = \frac{x}{L} \longrightarrow x = X^* L,$$

$$Y^* = \frac{y}{L} \longrightarrow y = Y^* L, \quad \delta y = L \delta Y^*$$

$$\delta y^2 = L^2 \delta Y^{*2}$$

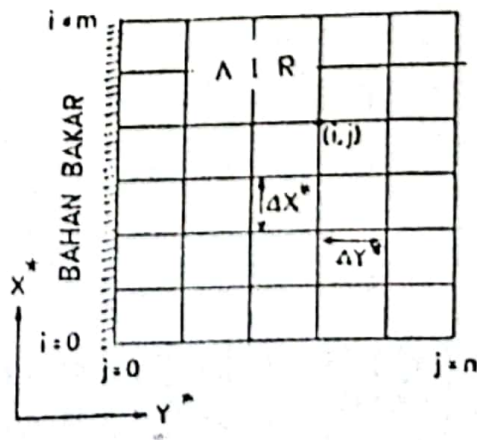
T₀ = suhu bagian tengah (sumbu) pelet uranium [°C], U_∞ = kecepatan rata-rata air dalam aliran bebas [m/dt].

Maka persamaan (4) berubah menjadi :

$$\frac{\delta T^*}{\delta \tau^*} =$$

$$\frac{\alpha}{L U_\infty} \frac{\delta^2 T^*}{\delta Y^{*2}} + \frac{L q'''_{maks}}{\rho c_p (T_0 - T_\infty) U_\infty} \sin [\pi X^*] \quad (6)$$

Persamaan (6) ini diselesaikan dengan cara membagi-bagi daerah yang diteliti menjadi bagian-bagian kecil ΔX* dan ΔY* seperti terlihat dalam Gambar 2.



Gambar 2. Pembagian daerah air pendingin yang diteliti

Dengan menggunakan metode beda hingga Crank-Nicolson (Crank-Nicolson finite-difference) persamaan (6) berubah menjadi :

$$\frac{T_{ij}^{*t+1} - T_{ij}^{*t}}{\Delta \tau^*} = \frac{\alpha}{L U_{\infty}} \frac{1}{2} \left[\frac{T_{ij+1}^{*t} - 2 T_{ij}^{*t} + T_{ij-1}^{*t}}{(\Delta Y^*)^2} + \frac{T_{ij+1}^{*t+1} - 2 T_{ij}^{*t+1} + T_{ij-1}^{*t+1}}{(\Delta Y^*)^2} \right] + \frac{L q_{maks}'''}{\rho c_p (T_0 - T_{\infty}) U_{\infty}} \sin [\pi X^*] \quad (7)$$

Substitusi : $\lambda = \frac{\alpha \Delta \tau^*}{L U_{\infty} (\Delta Y^*)^2}$ (8)

Maka persamaan (7) dapat ditulis dalam bentuk :

$$-\frac{\lambda}{2} T_{ij-1}^{*t+1} + (1 + \lambda) T_{ij}^{*t+1} - \frac{\lambda}{2} T_{ij+1}^{*t+1} = \frac{\lambda}{2} T_{ij-1}^{*t} + (1 - \lambda) T_{ij}^{*t} + \frac{\lambda}{2} T_{ij+1}^{*t} + \frac{\Delta \tau^* L q_{maks}'''}{\rho c_p (T_0 - T_{\infty}) U_{\infty}} \sin [\pi X^*] \quad (9)$$

atau

$$-\frac{\lambda}{2} T_{ij-1}^{*t+1} + (1 + \lambda) T_{ij}^{*t+1} - \frac{\lambda}{2} T_{ij+1}^{*t+1} = \frac{\lambda}{2} T_{ij-1}^{*t} + (1 - \lambda) T_{ij}^{*t} + \frac{\lambda}{2} T_{ij+1}^{*t} + Q^* \sin [\pi X^*] \quad (10)$$

di mana : $Q^* = \frac{\Delta \tau^* L q_{maks}'''}{\rho c_p (T_0 - T_{\infty}) U_{\infty}}$ (11)

$$\begin{bmatrix} -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & 0 & -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} T_{1,1}^{*t+1} \\ T_{1,2}^{*t+1} \\ \dots \\ T_{1,n+1}^{*t+1} \\ T_{1,n+2}^{*t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{2} T_{1,1}^{*t} + (1 - \lambda) T_{1,2}^{*t} & + \frac{\lambda}{2} T_{1,3}^{*t} & + Q^* \sin (\pi X^*) \\ \frac{\lambda}{2} T_{1,2}^{*t} + (1 - \lambda) T_{1,3}^{*t} & + \frac{\lambda}{2} T_{1,4}^{*t} & + Q^* \sin (\pi X^*) \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\lambda}{2} T_{1,n-1}^{*t} + (1 - \lambda) T_{1,n}^{*t} & + \frac{\lambda}{2} T_{1,n+1}^{*t} & + Q^* \sin (\pi X^*) \\ \frac{\lambda}{2} T_{1,n}^{*t} + (1 - \lambda) T_{1,n+1}^{*t} & + \frac{\lambda}{2} T_{1,n+2}^{*t} & + Q^* \sin (\pi X^*) \end{bmatrix}$$

Dengan $j = 2, 3, 4, \dots, n, n+1$, maka dari persamaan (10) dapat disusun persamaan bentuk matriks (12).

Digunakan syarat-syarat batas sebagai berikut :

- pada

$t > 0$ (atau juga pada $\tau^* > 0$)

$X^* = 0, \Delta X^*, 2\Delta X^*, 3\Delta X^*, \dots, (m-1)\Delta X^*, m\Delta X^*$,

$Y^* = 0$, (pada pusat pelet uranium)

maka :

$$T_{i,0}^* = \frac{(T_0 - T_{\infty})}{(T_0 - T_{\infty})} = 1 \quad (13a)$$

-pada

$t > 0$

$X^* = 0, \Delta X^*, 2\Delta X^*, 3\Delta X^*, \dots, (m-1)\Delta X^*, m\Delta X^*$,

$Y^* = (n_1+n_2+n_3)\Delta Y^*$, (pada derah air aliran bebas)

maka $T_{i,n_1+n_2+n_3+2}^* = \frac{(T_{\infty} - T_{\infty})}{(T_0 - T_{\infty})} = 0$

atau ditulis : $T_{i,n+2}^* = \frac{(T_{\infty} - T_{\infty})}{(T_0 - T_{\infty})} = 0$ (13b)

dan syarat-syarat awal sebagai berikut :

- pada

$t = 0$ (atau juga pada $\tau^* = 0$)

$X^* = 0, \Delta X^*, 2\Delta X^*, 3\Delta X^*, \dots, (m-1)\Delta X^*, m\Delta X^*$,

$Y^* = 0$, (pada pusat pelet uranium)

maka : $T_{i,0}^* = \frac{(T_0 - T_{\infty})}{(T_0 - T_{\infty})} = 1$ (13c)

pada

$t = 0$

$X^* = 0, \Delta X^*, 2\Delta X^*, 3\Delta X^*, \dots, (m-1)\Delta X^*, m\Delta X^*$,

$Y^* = \Delta Y^*, 2\Delta Y^*, 3\Delta Y^*, \dots, n\Delta Y^*, (n+2)\Delta Y^*$,

maka : $T_{ij}^* = \frac{(T_{\infty} - T_{\infty})}{(T_0 - T_{\infty})} = 0$ (13d)

maka: $T_{ij}^* = \frac{(T_\infty - T_0)}{(T_0 - T_\infty)} = 0$ (13d)

$n = n_1 + n_2 + n_3$, n_1 = jumlah segmen pada bagian pelet uranium, n_2 = jumlah segmen pada bagian kelongsong SS-304, n_3 = jumlah segmen pada bagian pendingin air.

$$m = \frac{b_k}{d_{k-1}} \quad d_k = d_k - m a_{k-1}$$

$$c_k = c_k - m c_{k-1} \quad (16)$$

Kemudian untuk $k = n-1, n-2, \dots, 2, 1$ substitusi :

$$\begin{bmatrix} 0 & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{1,1}^{*t+1} \\ T_{1,2}^{*t+1} \\ \dots \\ T_{1,n+1}^{*t+1} \\ T_{1,n+2}^{*t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{2} T_{1,1}^{*t} + (1-\lambda) T_{1,2}^{*t} + \frac{\lambda}{2} T_{1,3}^{*t} + Q^* \sin(\pi X^*) + \frac{\lambda}{2} \\ \frac{\lambda}{2} T_{1,2}^{*t} + (1-\lambda) T_{1,3}^{*t} + \frac{\lambda}{2} T_{1,4}^{*t} + Q^* \sin(\pi X^*) \\ \dots \\ \frac{\lambda}{2} T_{1,n+1}^{*t} + (1-\lambda) T_{1,n+2}^{*t} + \frac{\lambda}{2} T_{1,n+3}^{*t} + Q^* \sin(\pi X^*) \\ \frac{\lambda}{2} T_{1,n+2}^{*t} + (1-\lambda) T_{1,n+3}^{*t} + \frac{\lambda}{2} T_{1,n+4}^{*t} + Q^* \sin(\pi X^*) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Substitusi syarat-syarat batas (13a) dan (13b) dalam persamaan (12) akan menghasilkan suatu persamaan matriks tridiagonal :

Substitusi :

$d_j = 1 + l$ (elemen-elemen diagonal)
 $b_j = -\frac{\lambda}{2}$ (elemen-elemen di bawah diagonal).
 $a_j = -\frac{\lambda}{2}$ (elemen-elemen di atas diagonal)
 $c_j = \frac{\lambda}{2} T_{ij}^{*t} + (1-\lambda) T_{ij+1}^{*t} + \frac{\lambda}{2} T_{ij+2}^{*t} + Q^* \sin(\pi X^*)$
 (elemen-elemen konstan ruas kanan).

dengan $j = 1, 2, 3, 4, \dots, n-1, n, n+1$
kecuali :

$b_1 = a_{n+2} = 0$ (untuk $j=1$ dan $j=2$),

$$\frac{\lambda}{2} T_{i,1}^{*t} + (1-\lambda) T_{i,2}^{*t} + \frac{\lambda}{2} T_{i,3}^{*t} + Q^* \sin(\pi X^*) + \frac{c_1}{2}$$

maka persamaan (15) dapat ditulis dalam bentuk:

$$b_j T_{ij-1}^{*t+1} + d_j T_{ij}^{*t+1} + a_j T_{ij+1}^{*t+1} = c_j \quad (15)$$

Untuk $k = 2, 3, 4, \dots, n-1, n$
maka substitusi :

$$T_{i,k}^{*t+1} = \frac{c_k - a_k T_{i,k+1}^{*t}}{d_k} \quad (17)$$

Dengan demikian harga-harga suhu segmen-segmen pelet $T_{i,k}^*$ untuk setiap waktu t dapat dihitung.

Konduksi dalam kelongsong SS-304

Perpindahan panas konduksi dalam kelongsong SS-304 dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan diferensial parsial (tanpa sumber panas q''),

$$\frac{\delta T}{\delta t} = \alpha \frac{\delta^2 T}{\delta y^2} \quad (18)$$

atau :

$$\frac{\delta (T - T_\infty)}{\delta t} = \alpha \frac{\delta^2 (T - T_\infty)}{\delta y^2} \quad (19)$$

di mana :

α = difusivitas termal kelongsong SS-304 [m^2 /detik]

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (20)$$

Substitusi variabel-variabel tanpa dimensi T^* , τ^* dan Y^* seperti pada konduksi pelet uranium maka persamaan (21) berubah menjadi :

$$\frac{\delta T^*}{\delta t^*} = \frac{\alpha}{L U_{\infty}} \frac{\delta^2 T^*}{\delta Y^{*2}} \quad (21)$$

Dengan menggunakan metode beda hingga Crank-Nicolson (Crank-Nicolson finite-difference), persamaan (21) berubah menjadi :

$$\frac{T_{ij}^{*t+1} - T_{ij}^{*t}}{\Delta \tau^*} = \frac{\alpha}{L U_{\infty}} \frac{1}{2} \left[\frac{T_{ij+1}^{*t} - 2 T_{ij}^{*t} + T_{ij-1}^{*t}}{(\Delta Y^*)^2} + \frac{T_{ij+1}^{*t+1} - 2 T_{ij}^{*t+1} + T_{ij-1}^{*t+1}}{(\Delta Y^*)^2} \right] \quad (22)$$

Substitusi : $\lambda = \frac{\alpha \Delta \tau^*}{L U_{\infty} (\Delta Y^*)^2}$

maka akan diperoleh persamaan matriks :
Digunakan syarat-syarat batas sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{1,1}^{*t+1} \\ T_{1,2}^{*t+1} \\ \dots \\ T_{1,n+1}^{*t+1} \\ T_{1,n+2}^{*t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{2} T_{1,1}^{*t} + (1-\lambda) T_{1,2}^{*t} + \frac{\lambda}{2} T_{1,3}^{*t} \\ \frac{\lambda}{2} T_{1,2}^{*t} + (1-\lambda) T_{1,3}^{*t} + \frac{\lambda}{2} T_{1,4}^{*t} \\ \dots \\ \frac{\lambda}{2} T_{1,n+1}^{*t} + (1-\lambda) T_{1,n+2}^{*t} + \frac{\lambda}{2} T_{1,n+3}^{*t} \\ \frac{\lambda}{2} T_{1,n+2}^{*t} + (1-\lambda) T_{1,n+3}^{*t} + \frac{\lambda}{2} T_{1,n+4}^{*t} \end{bmatrix} \quad (23)$$

- pada $t > 0$ (atau juga pada $\tau^* > 0$)
 $X^* = 0, \Delta X^*, 2\Delta X^*, 3\Delta X^*, \dots, (m-1)\Delta X^*, m\Delta X^*$,
 $Y^* = 0$, (pada dinding luar pelet uranium)
maka :

$$T_{i,0}^* = \frac{(T_{i,pl} - T_{\infty})}{(T_0 - T_{\infty})} \quad (24a),$$

-pada $t > 0$
 $X^* = 0, \Delta X^*, 2\Delta X^*, 3\Delta X^*, \dots, (m-1)\Delta X^*, m\Delta X^*$,
 $Y^* = (n+2)\Delta Y^*$, (pada daerah air aliran bebas)
maka :

$$T_{i,n+2}^* = \frac{(T_{\infty} - T_0)}{(T_0 - T_{\infty})} = 0$$

atau ditulis : $T_{i,n+2}^* = \frac{(T_{\infty} - T_0)}{(T_0 - T_{\infty})} = 0 \quad (24b),$

dan syarat-syarat awal sebagai berikut:

-pada $t = 0$ (atau juga pada $\tau^* = 0$)
 $X^* = 0, \Delta X^*, 2\Delta X^*, 3\Delta X^*, \dots, (m-1)\Delta X^*, m\Delta X^*$,
 $Y^* = 0$, (pada dinding luar pelet uranium)

maka : $T_{i,0}^* = \frac{(T_{i,pl} - T_0)}{(T_0 - T_{\infty})} \quad (24c)$

- pada $t = 0$
 $X^* = 0, \Delta X^*, 2\Delta X^*, 3\Delta X^*, \dots, (m-1)\Delta X^*, m\Delta X^*$,
 $Y^* = \Delta Y^*, 2\Delta Y^*, 3\Delta Y^*, \dots, (n+1)\Delta Y^*, (n+2)\Delta Y^*$,

maka: $T_{i,1}^* = \frac{(T_{\infty} - T_0)}{(T_0 - T_{\infty})} = 0 \quad (24d)$

$n = n_2 + n_3$; $T_{i,pl}$ = suhu dinding pelet uranium (= suhu dinding dalam kelongsong SS-304) [°C]. Suhu T_{pl} ini diperoleh pada perhitungan

konduksi pelet uranium.

Substitusi syarat-syarat batas (24a) dan (24b) dalam persamaan (23) akan menghasilkan suatu persamaan matriks tridiagonal (25).

Dengan cara yang sama untuk menyelesaikan persamaan matriks tridiagonal seperti perhitungan konduksi pelet uranium, maka harga-harga suhu segmen-segmen kelongsong T_{ij}^* untuk setiap waktu t dapat dihitung.

Konveksi alamiah dari dinding luar kelongsong ke air pendingin

Untuk menganalisis konveksi alamiah dari dinding luar kelongsong ke air pendingin, digu-

$$\begin{bmatrix} 0 & c(1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{\lambda}{2} & c(1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & 0 & -\frac{\lambda}{2} & c(1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & 0 & -\frac{\lambda}{2} & c(1+\lambda) & 0 \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} T_{1,1}^{m,t+1} \\ T_{1,2}^{m,t+1} \\ \dots \\ T_{1,n+1}^{m,t+1} \\ T_{1,n+2}^{m,t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{2} T_{1,1}^{m,t} + c(1-\lambda) T_{1,2}^{m,t} + \frac{\lambda}{2} T_{1,3}^{m,t} + \frac{\lambda}{2} \frac{(T_{1,p1} - T_{\infty})}{(T_0 - T_{\infty})} \\ \frac{\lambda}{2} T_{1,2}^{m,t} + c(1-\lambda) T_{1,3}^{m,t} + \frac{\lambda}{2} T_{1,4}^{m,t} \\ \dots \\ \frac{\lambda}{2} T_{1,n+1}^{m,t} + c(1-\lambda) T_{1,n+2}^{m,t} + \frac{\lambda}{2} T_{1,n+3}^{m,t} \\ \frac{\lambda}{2} T_{1,n+2}^{m,t} + c(1-\lambda) T_{1,n+3}^{m,t} + \frac{\lambda}{2} T_{1,n+4}^{m,t} \end{bmatrix}$$

nakan persamaan-persamaan kekekalan energi, kekekalan momentum dan kontinuitas.

a. Persamaan kekekalan energi

$$\frac{\delta(T - T_{\infty})}{\delta t} + u \frac{\delta(T - T_{\infty})}{\delta x} + v \frac{\delta(T - T_{\infty})}{\delta y} = \alpha \left[\frac{\delta^2(T - T_{\infty})}{\delta y^2} \right] \quad (26)$$

b. Persamaan kekekalan momentum

$$\rho \left[u \frac{\delta u}{\delta x} + v \frac{\delta u}{\delta y} \right] = g \rho \beta (T - T_{\infty}) + \mu \left[\frac{\delta^2 u}{\delta y^2} \right] \quad (27)$$

c. Persamaan kontinuitas

$$\frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} = 0 \quad (28)$$

u = komponen kecepatan arah sumbu x [m/dt],
 v = komponen kecepatan arah sumbu y [m/dt],
 g = percepatan gravitasi [m/dt²], β = koefisien muai volume air [°C⁻¹], μ = viskositas dinamik air [kg/m dt], α = $\frac{k}{\rho c_p}$ = difusivitas termal air [m²/dt], k = konduktivitas panas air [W/m°C], ρ = rapat massa (densitas) air [kg/m³], c_p = panas jenis air pada tekanan konstan [kJ/kg °C], ν = $\frac{\mu}{\rho}$ = viskositas kinematik air [m²/dt].

Substitusi variabel-variabel tanpa dimensi :

$$X^* = \frac{x}{L} \rightarrow x = X^* L, \quad \delta x = L \delta X^*$$

$$Y^* = \frac{y}{L} \rightarrow y = Y^* L, \quad \delta y = L \delta Y^*, \quad \delta y^2 = L^2 \delta Y^{*2}$$

$$U^* = \frac{u}{U_{\infty}} \rightarrow u = U^* U_{\infty}, \quad \delta u = U_{\infty} \delta U^*$$

$$V^* = \frac{v}{U_{\infty}} \rightarrow v = V^* U_{\infty}, \quad \delta v = U_{\infty} \delta V^*$$

$$T^* = \frac{(T - T_{\infty})}{(T_0 - T_{\infty})} \rightarrow T - T_{\infty} = T^* (T_0 - T_{\infty})$$

$$\delta(T - T_{\infty}) = (T_0 - T_{\infty}) \delta T^*$$

$$\tau^* = \frac{t U_{\infty}}{L} \rightarrow t = \frac{L}{U_{\infty}} \tau^*, \quad \delta t = \frac{L}{U_{\infty}} \delta \tau^*$$

L = panjang elemen bakar [m], U_∞ = kecepatan rata-rata air dalam aliran bebas [m/dt], maka persamaan (26) berubah menjadi

$$\frac{\delta T^*}{\delta \tau^*} + U^* \frac{\delta T^*}{\delta X^*} + V^* \frac{\delta T^*}{\delta Y^*} = \frac{1}{Pr Re} \frac{\delta^2 T^*}{\delta Y^{*2}} \quad (29)$$

persamaan (27) berubah menjadi

$$\frac{\delta U^*}{\delta \tau^*} + U^* \frac{\delta U^*}{\delta X^*} + V^* \frac{\delta U^*}{\delta Y^*} = \frac{Gr}{Re^2} T^* + \frac{1}{Re} \frac{\delta^2 U^*}{\delta Y^{*2}} \quad (30)$$

persamaan (28) berubah menjadi

$$\frac{\delta U^*}{\delta X^*} + \frac{\delta V^*}{\delta Y^*} = 0 \quad (31)$$

$$Gr = \frac{\rho^2 g \beta (T_w - T_\infty) L^3}{\mu^2} = \text{Bilangan Grashof} \quad (32)$$

$$Re = \frac{\rho U_\infty L}{\mu} = \text{Bilangan Reynolds} \quad (33)$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \text{Bilangan Prandtl} \quad (34)$$

Dengan menggunakan metode beda hingga Crank-Nicolson (Crank-Nicolson finite-difference), persamaan (29) berubah menjadi :

$$\frac{T_{i,j}^{t+1} - T_{i,j}^t}{\Delta \tau} + U_{i,j}^t \frac{T_{i+1,j}^t - T_{i,j}^t}{\Delta X} +$$

$$V_{i,j}^t \frac{T_{i,j+1}^t - T_{i,j}^t}{\Delta Y} = \frac{1}{Pr} \frac{1}{Re} \frac{1}{2}$$

$$\left[\frac{T_{i,j+1}^t - 2 T_{i,j}^t + T_{i,j-1}^t}{(\Delta Y)^2} + \frac{T_{i,j+1}^{t+1} - 2 T_{i,j}^{t+1} + T_{i,j-1}^{t+1}}{(\Delta Y)^2} \right] \quad (35)$$

persamaan (30) berubah menjadi :

$$\frac{U_{i,j}^{t+1} - U_{i,j}^t}{\Delta \tau} + U_{i,j}^t \frac{U_{i+1,j}^t - U_{i,j}^t}{\Delta X} +$$

$$V_{i,j}^t \frac{U_{i,j+1}^t - U_{i,j}^t}{\Delta Y} = \frac{Gr}{Re^2} T_{i,j}^t \frac{1}{Re} \frac{1}{2}$$

$$\left[\frac{U_{i,j+1}^t - 2 U_{i,j}^t + U_{i,j-1}^t}{(\Delta Y)^2} + \frac{U_{i,j+1}^{t+1} - 2 U_{i,j}^{t+1} + U_{i,j-1}^{t+1}}{(\Delta Y)^2} \right] \quad (36)$$

persamaan (31) berubah menjadi :

$$\frac{U_{i+1,j}^t - U_{i,j}^t}{\Delta X} + \frac{V_{i,j+1}^t - V_{i,j}^t}{\Delta Y} = 0 \quad (37)$$

$$\begin{bmatrix} -\frac{\lambda}{2 Pr} (1 + \frac{\lambda}{Pr}) & -\frac{\lambda}{2 Pr} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{\lambda}{2 Pr} (1 + \frac{\lambda}{Pr}) & -\frac{\lambda}{2 Pr} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & -\frac{\lambda}{2 Pr} (1 + \frac{\lambda}{Pr}) & -\frac{\lambda}{2 Pr} \\ 0 & \dots & 0 & -\frac{\lambda}{2 Pr} (1 + \frac{\lambda}{Pr}) & -\frac{\lambda}{2 Pr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{1,1}^{t+1} \\ T_{1,2}^{t+1} \\ \dots \\ T_{1,n3+1}^{t+1} \\ T_{1,n3+2}^{t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{2 Pr} T_{1,1}^t + (1 - \frac{\lambda}{Pr} + \lambda_x U_{1,2}^t + \lambda_y V_{1,2}^t) T_{1,2}^t + \dots \\ (\frac{\lambda}{2 Pr} - \lambda_x V_{1,2}^t) T_{1,3}^t - \lambda_x U_{1,2}^t T_{1+1,2}^t + \dots \\ \dots \\ \frac{\lambda}{2 Pr} T_{1,n3+1}^t + (1 - \frac{\lambda}{Pr} + \lambda_x U_{1,n3+2}^t + \lambda_y V_{1,n3+2}^t) T_{1,n3+2}^t + \dots \\ (\frac{\lambda}{2 Pr} - \lambda_x V_{1,n3+2}^t) T_{1,n3+3}^t - \lambda_x U_{1,n3+2}^t T_{1+1,n3+2}^t + \dots \\ \dots \\ \frac{\lambda}{2 Pr} T_{1,n3+2}^t + (1 - \frac{\lambda}{Pr} + \lambda_x U_{1,n3+3}^t + \lambda_y V_{1,n3+3}^t) T_{1,n3+3}^t + \dots \\ (\frac{\lambda}{2 Pr} - \lambda_x V_{1,n3+3}^t) T_{1,n3+4}^t - \lambda_x U_{1,n3+3}^t T_{1+1,n3+3}^t \end{bmatrix} \quad (40)$$

Substitusi :

$$\lambda_x = \frac{\Delta \tau^*}{\Delta X^*} \quad \lambda_y = \frac{\Delta \tau^*}{\Delta Y^*} \quad \lambda = \frac{\Delta \tau^*}{Re (\Delta Y^*)^2} \quad (38)$$

Maka persamaan (35) dapat ditulis dalam bentuk :

$$-\frac{\lambda}{2 Pr} T_{i,j-1}^{t+1} + \left(1 + \frac{\lambda}{Pr}\right) T_{i,j}^{t+1} - \frac{\lambda}{2 Pr} T_{i,j+1}^{t+1} =$$

$$\frac{\lambda}{2 Pr} T_{i,j-1}^t + \left(1 - \frac{\lambda}{Pr} + \lambda_x U_{i,j}^t + \lambda_y V_{i,j}^t\right) T_{i,j}^t +$$

$$\left(\frac{\lambda}{2 Pr} - \lambda_y V_{i,j}^t\right) T_{i,j+1}^t - \lambda_x U_{i,j}^t T_{i+1,j}^t \quad (39)$$

Dengan $j = 2, 3, 4, \dots, n3, n3+1$, maka dari persamaan (39) dapat disusun persamaan matriks (40).

Digunakan syarat-syarat batas sebagai berikut :

-pada

$t > 0$ (atau juga pada $\tau^* > 0$)

$X^* = 0, \Delta X^*, 2\Delta X^*, 3\Delta X^*, \dots, (m-1)\Delta X^*, m\Delta X^*$,

$Y^* = 0$, (pada dinding luar kelongsong SS-304)

$$\text{maka : } T_{i,0}^* = \frac{(T_{i,kl} - T_\infty)}{(T_0 - T_\infty)} \quad (41a)$$

- pada $t > 0$

$X^* = 0, \Delta X^*, 2\Delta X^*, 3\Delta X^*, \dots, (m-1)\Delta X^*, m\Delta X^*$

$Y^* = (n3+2)\Delta Y^*$, (pada air aliran bebas)

$$\text{maka : } T_{i,n3+2}^* = \frac{(T_\infty - T_\infty)}{(T_0 - T_\infty)} = 0 \quad (41b)$$

dan syarat-syarat awal sebagai berikut :

-pada

$t = 0$ (atau juga pada $\tau^* = 0$)

$X^* = 0, \Delta X^*, 2\Delta X^*, 3\Delta X^*, \dots, (m-1)\Delta X^*, m\Delta X^*$,

$Y^* = 0$, (pada dinding luar kelongsong SS-304)

$Y^* = (n3+2)\Delta Y^*$, (pada air aliran bebas)

maka: $T_{i,n3+2}^* = \frac{(T_\infty - T_0)}{(T_0 - T_\infty)} = 0$ (41b)

dan syarat-syarat awal sebagai berikut :
-pada

$t = 0$ (atau juga pada $\tau^* = 0$)
 $X^* = 0, \Delta X^*, 2\Delta X^*, 3\Delta X^*, \dots, (m-1)\Delta X^*, m\Delta X^*$,
 $Y^* = 0$, (pada dinding luar kelongsong SS-304)

maka: $T_{i,0}^* = \frac{(T_{i,kl} - T_\infty)}{(T_0 - T_\infty)}$ (41c)

- pada $t = 0$
 $X^* = 0, \Delta X^*, 2\Delta X^*, 3\Delta X^*, \dots, (m-1)\Delta X^*, m\Delta X^*$

$$\frac{\lambda}{2} U_{ij-1}^{*t} + (1 - \lambda + \lambda_x U_{ij}^{*t} + \lambda_y V_{ij}^{*t}) U_{ij}^{*t} + (\frac{\lambda}{2} - \lambda_y V_{ij}^{*t}) U_{ij+1}^{*t} - \lambda_x U_{ij}^{*t} U_{i+1j}^{*t} + \frac{Gr}{Re^2} T_{ij}^{*t}$$
 (43)

Dengan $j = 2, 3, 4, \dots, n3, n3+1$, maka dari persamaan (43) dapat disusun persamaan matriks(44).

Digunakan syarat-syarat batas sebagai berikut :

-pada
 $t > 0$ (atau juga pada $\tau^* > 0$)
 $X^* = 0, \Delta X^*, 2\Delta X^*, 3\Delta X^*, \dots, (m-1)\Delta X^*, m\Delta X^*$,

$$\begin{bmatrix} 0 & (1 + \frac{\lambda}{Pr}) & -\frac{\lambda}{2 Pr} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{\lambda}{2 Pr} & (1 + \frac{\lambda}{Pr}) & -\frac{\lambda}{2 Pr} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & -\frac{\lambda}{2 Pr} & (1 + \frac{\lambda}{Pr}) & -\frac{\lambda}{2 Pr} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & -\frac{\lambda}{2 Pr} & (1 + \frac{\lambda}{Pr}) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{i,1}^{*t+1} \\ T_{i,2}^{*t+1} \\ \dots \\ T_{i,n3+1}^{*t+1} \\ T_{i,n3+2}^{*t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{2 Pr} T_{i,1}^{*t} + (1 - \frac{\lambda}{Pr} + \lambda_x U_{i,2}^{*t} + \lambda_y V_{i,2}^{*t}) T_{i,1}^{*t} + (\frac{\lambda}{2 Pr} - \lambda_y V_{i,2}^{*t}) T_{i,3}^{*t} - \lambda_x U_{i,2}^{*t} T_{i+1,2}^{*t} + \frac{\lambda}{2 Pr} \frac{(T_0 - T_\infty)}{(T_0 - T_\infty)} \\ \frac{\lambda}{2 Pr} T_{i,2}^{*t} + (1 - \frac{\lambda}{Pr} + \lambda_x U_{i,3}^{*t} + \lambda_y V_{i,3}^{*t}) T_{i,2}^{*t} + (\frac{\lambda}{2 Pr} - \lambda_y V_{i,3}^{*t}) T_{i,4}^{*t} - \lambda_x U_{i,3}^{*t} T_{i+1,3}^{*t} \\ \dots \\ \frac{\lambda}{2 Pr} T_{i,n3+1}^{*t} + (1 - \frac{\lambda}{Pr} + \lambda_x U_{i,n3+2}^{*t} + \lambda_y V_{i,n3+2}^{*t}) T_{i,n3+1}^{*t} + (\frac{\lambda}{2 Pr} - \lambda_y V_{i,n3+2}^{*t}) T_{i,n3+3}^{*t} - \lambda_x U_{i,n3+2}^{*t} T_{i+1,n3+2}^{*t} \\ \frac{\lambda}{2 Pr} T_{i,n3+2}^{*t} + (1 - \frac{\lambda}{Pr} + \lambda_x U_{i,n3+3}^{*t} + \lambda_y V_{i,n3+3}^{*t}) T_{i,n3+2}^{*t} + (\frac{\lambda}{2 Pr} - \lambda_y V_{i,n3+3}^{*t}) T_{i,n3+4}^{*t} - \lambda_x U_{i,n3+3}^{*t} T_{i+1,n3+3}^{*t} \end{bmatrix}$$
 (42)

$Y^* = \Delta Y^*, 2\Delta Y^*, 3\Delta Y^*, \dots, (n3-1)\Delta Y^*, n3\Delta Y^*$,
maka: $T_{ij}^* = \frac{(T_\infty - T_0)}{(T_0 - T_\infty)} = 0$ (41d)

di mana : $T_{i,kl}$ = suhu dinding luar kelongsong SS-304 [°C]. Suhu T_{kl} ini diperoleh pada perhitungan konduksi kelongsong SS-304.

Substitusi syarat-syarat batas (41a) dan (41b) dalam persamaan (40) akan menghasilkan suatu persamaan matriks tridiagonal (42).

Dengan cara yang sama untuk menyelesaikan persamaan matriks tridiagonal seperti perhitungan konduksi pelet uranium, maka harga-harga suhu air pendingin T_{ij}^* untuk setiap waktu t dapat dihitung.

Untuk mencari harga-harga kecepatan vertikal air U_{ij}^* , substitusi harga-harga λ_x, λ_y maka persamaan (36) dapat ditulis dalam bentuk :

$$-\frac{\lambda}{2} U_{ij-1}^{*t+1} + (1 + \lambda) U_{ij}^{*t+1} - \frac{\lambda}{2} U_{ij+1}^{*t+1} =$$

$Y^* = 0$, (pada dinding luar kelongsong SS-304)
maka : $U_{i,0}^* = 0$ (45a)
 $V_{i,1}^* = 0$

- pada $t > 0$
 $X^* = 0, \Delta X^*, 2\Delta X^*, 3\Delta X^*, \dots, (m-1)\Delta X^*, m\Delta X^*$
 $Y^* = (n3+2)\Delta Y^*$,
maka: $U_{i,n3+2}^* = \frac{U_\infty}{U_\infty} = 1$ (45b)

dan syarat-syarat awal sebagai berikut :

-pada
 $t = 0$ (atau juga pada $\tau^* = 0$)
 $X^* = 0, \Delta X^*, 2\Delta X^*, 3\Delta X^*, \dots, (m-1)\Delta X^*, m\Delta X^*$,
 $Y^* = 0$, (pada dinding luar kelongsong SS-304)
maka : $U_{i,0}^* = 0$ (45c)
 $V_{i,0}^* = 0$

- pada $t = 0$
 $X^* = 0, \Delta X^*, 2\Delta X^*, 3\Delta X^*, \dots, (m-1)\Delta X^*, m\Delta X^*$
 $Y^* = \Delta Y^*, 2\Delta Y^*, 3\Delta Y^*, \dots, (n3-1)\Delta Y^*, n3\Delta Y^*$,

$$\begin{bmatrix} -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_{1,1}^{*t+1} \\ U_{1,2}^{*t+1} \\ \dots \\ U_{1,n3+1}^{*t+1} \\ U_{1,n3+2}^{*t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{2} U_{1,1}^{*t} + (1 - \lambda + \lambda_x U_{1,2}^{*t} + \lambda_y V_{1,2}^{*t}) U_{1,2}^{*t} + (\frac{\lambda}{2} - \lambda_y V_{1,2}^{*t}) U_{1,3}^{*t} - \lambda_x U_{1,2}^{*t} U_{1+1,2}^{*t} + \frac{Gr}{Re^2} T_{1,2}^{*t} \\ \frac{\lambda}{2} U_{1,2}^{*t} + (1 - \lambda + \lambda_x U_{1,3}^{*t} + \lambda_y V_{1,3}^{*t}) U_{1,3}^{*t} + (\frac{\lambda}{2} - \lambda_y V_{1,3}^{*t}) U_{1,4}^{*t} - \lambda_x U_{1,3}^{*t} U_{1+1,3}^{*t} + \frac{Gr}{Re^2} T_{1,2}^{*t} \\ \dots \\ \frac{\lambda}{2} U_{1,n3+1}^{*t} + (1 - \lambda + \lambda_x U_{1,n3+2}^{*t} + \lambda_y V_{1,n3+2}^{*t}) U_{1,n3+2}^{*t} + (\frac{\lambda}{2} - \lambda_y V_{1,n3+2}^{*t}) U_{1,n3+3}^{*t} - \lambda_x U_{1,n3+2}^{*t} U_{1+1,n3+2}^{*t} + \frac{Gr}{Re^2} T_{1,n3+2}^{*t} \\ \frac{\lambda}{2} U_{1,n3+2}^{*t} + (1 - \lambda + \lambda_x U_{1,n3+3}^{*t} + \lambda_y V_{1,n3+3}^{*t}) U_{1,n3+3}^{*t} + (\frac{\lambda}{2} - \lambda_y V_{1,n3+3}^{*t}) U_{1,n3+4}^{*t} - \lambda_x U_{1,n3+3}^{*t} U_{1+1,n3+3}^{*t} + \frac{Gr}{Re^2} T_{1,n3+3}^{*t} \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & 0 & 0 & -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & -\frac{\lambda}{2} & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & -\frac{\lambda}{2} & (1+\lambda) & 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} U_{1,1}^{*t+1} \\ U_{1,2}^{*t+1} \\ \dots \\ U_{1,n3+1}^{*t+1} \\ U_{1,n3+2}^{*t+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\lambda}{2} U_{1,1}^{*t} + (1 - \lambda + \lambda_x U_{1,2}^{*t} + \lambda_y V_{1,2}^{*t}) U_{1,2}^{*t} + (\frac{\lambda}{2} - \lambda_y V_{1,2}^{*t}) U_{1,3}^{*t} - \lambda_x U_{1,2}^{*t} U_{1+1,2}^{*t} + \frac{Gr}{Re^2} T_{1,2}^{*t} \\ \frac{\lambda}{2} U_{1,2}^{*t} + (1 - \lambda + \lambda_x U_{1,3}^{*t} + \lambda_y V_{1,3}^{*t}) U_{1,3}^{*t} + (\frac{\lambda}{2} - \lambda_y V_{1,3}^{*t}) U_{1,4}^{*t} - \lambda_x U_{1,3}^{*t} U_{1+1,3}^{*t} + \frac{Gr}{Re^2} T_{1,2}^{*t} \\ \dots \\ \frac{\lambda}{2} U_{1,n3+1}^{*t} + (1 - \lambda + \lambda_x U_{1,n3+2}^{*t} + \lambda_y V_{1,n3+2}^{*t}) U_{1,n3+2}^{*t} + (\frac{\lambda}{2} - \lambda_y V_{1,n3+2}^{*t}) U_{1,n3+3}^{*t} - \lambda_x U_{1,n3+2}^{*t} U_{1+1,n3+2}^{*t} + \frac{Gr}{Re^2} T_{1,n3+2}^{*t} \\ \frac{\lambda}{2} U_{1,n3+2}^{*t} + (1 - \lambda + \lambda_x U_{1,n3+3}^{*t} + \lambda_y V_{1,n3+3}^{*t}) U_{1,n3+3}^{*t} + (\frac{\lambda}{2} - \lambda_y V_{1,n3+3}^{*t}) U_{1,n3+4}^{*t} - \lambda_x U_{1,n3+3}^{*t} U_{1+1,n3+3}^{*t} + \frac{Gr}{Re^2} T_{1,n3+3}^{*t} \end{bmatrix} \quad (46)$$

maka: $U_{ij}^* = \frac{U_\infty}{U_\infty} = 1$ (45d)
 $V_{i,0}^* = 0$

$$\frac{U_{i+1j}^* - U_{ij}^*}{\Delta X^*} + \frac{V_{i+1j}^* - V_{ij}^*}{\Delta Y^*} = 0 \quad (47)$$

Substitusi syarat-syarat batas (45a) dan (45b) dalam persamaan (44) akan menghasilkan suatu persamaan matriks tridiagonal(46):
 Dengan cara yang sama untuk menyelesaikan persamaan matriks tridiagonal seperti perhitungan konduksi pelet uranium, maka harga-harga kecepatan air vertikal U_{ij}^* untuk setiap waktu t dapat dihitung.
 Dengan menggunakan metode beda hingga maka persamaan (31) berubah menjadi :

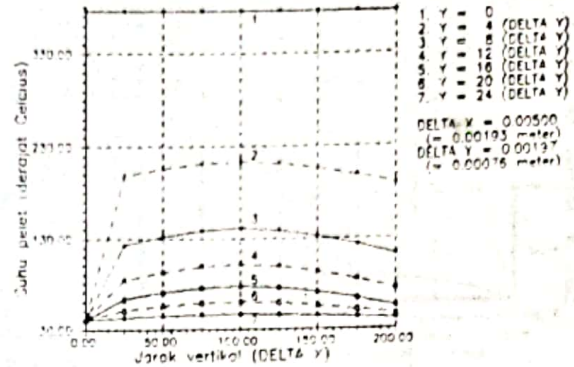
Dengan substitusi harga-harga awal V_{ij}^* dan substitusi harga-harga U_{ij}^* yang diperoleh dari penyelesaian persamaan (46) ke dalam persamaan (47) maka akan diperoleh harga-harga kecepatan horisontal V_{ij}^* untuk setiap waktu t (atau τ^*).

CARA PENELITIAN
 Dalam penelitian ini dilaksanakan gabungan antara eksperimen dan perhitungan. Ekspe-

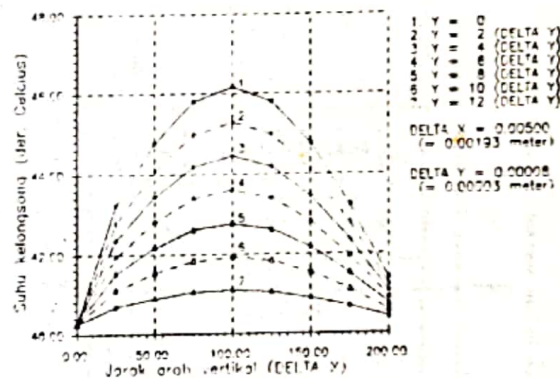
rimen dilakukan untuk memperoleh data suhu elemen bakar dan suhu air pendingin masuk dan keluar tangki reaktor. Suhu elemen bakar diukur dengan Instrumented Fuel Element (IFE), sedang suhu air pendingin diukur menggunakan termokopel fluida. Instrumented Fuel Element (IFE) adalah suatu elemen bakar yang dilengkapi dengan 3 buah termokopel chromel-alumel. Cara eksperimen :

1. Mula-mula ditentukan posisi elemen bakar yang mana yang akan diukur suhunya misalkan posisi B-2. Elemen bakarnya dikeluarkan dari teras dan ditempatkan pada rak di luar teras.
2. IFE kemudian dimasukkan dalam tempat elemen bakar dalam teras (posisi B-2) di mana elemen bakarnya telah dikeluarkan.
3. Termokopel fluida ditempatkan pada lubang kolektor terdekat dari posisi B-2.
4. Reaktor dioperasikan mula-mula pada daya 100 kW, ditunggu sampai penunjukan suhu pada IFE dan termokopel fluida sudah mencapai kondisi tunak (steady state); suhu-suhu penunjukan IFE, termokopel fluida dan suhu-suhu masuk serta keluar tangki reaktor dicatat (cara pengukuran/pencatatan suhu dapat dilakukan dengan Data Logger).
5. Daya reaktor dinaikkan 200, 300, 400, 500, 600 dan 700 kW, pada tiap daya dilakukan pencatatan seperti pada nomor 4.
6. Daya reaktor diturunkan sampai nol dan dimatikan (shut-down).
7. IFE dan termokopel fluida dikeluarkan dari teras untuk disimpan di tempat penyimpanan.
8. Elemen bakar yang berada di rak, dikembalikan ke posisi semula.

Disebabkan penunjukan termokopel fluida memperlihatkan harga penunjukan yang tidak benar yaitu pada daya reaktor naik, penunjukan suhu bahkan turun, maka untuk data suhu air dalam teras reaktor diambil harga rata-rata suhu masuk dan keluar tangki reaktor. Data hasil pengukuran-pengukuran suhu tersebut dimasukkan sebagai syarat-syarat awal untuk menyelesaikan persamaan model matematis secara numerik. Kemudian dilakukan perhitungan numerik sesuai dengan diagram-diagram alir 1a dan 1b, maka salah satu hasil perhitungan yang diperoleh adalah seperti ditunjukkan dalam Tabel 1 dan Gambar 3, 4, 5, 6 dan 7



Gambar 3. Suhu pelet terhadap jarak vertikal (DELTA X) pada $\tau = 0,100$ ($t = 5,449875$ detik).

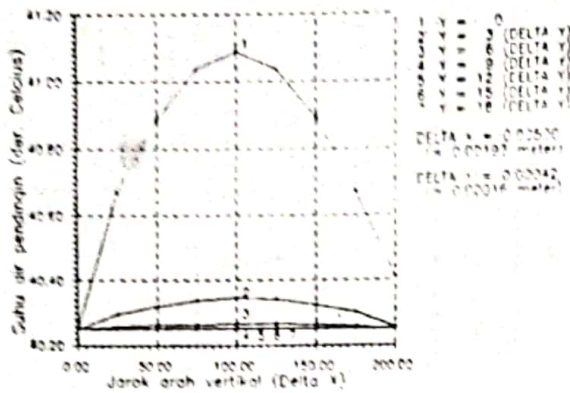


Gambar 4. Suhu kelongsong terhadap jarak vertikal (DELTA X) pada $\tau = 0,100$ ($t = 5,449875$ detik).

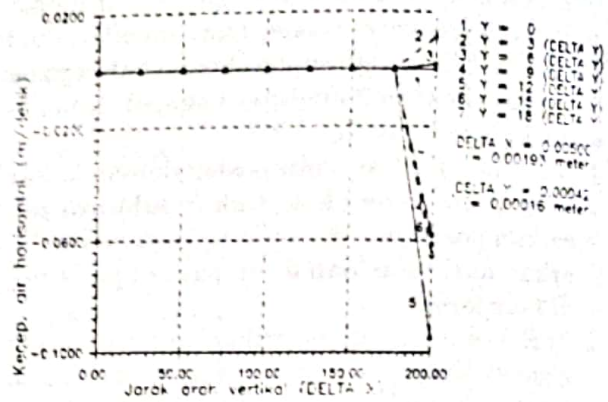
PEMBAHASAN DAN KESIMPULAN

Dari salah satu hasil-hasil yang diperoleh (Tabel 1, Gambar 3, 4, 5, 6 dan 7 dengan harga awal $DTAU (\Delta\tau) = 0,00500$ maka pada saat $TAU (\tau) = 0,10000000$ atau pada $t = 5,449875$ detik tampak bahwa :

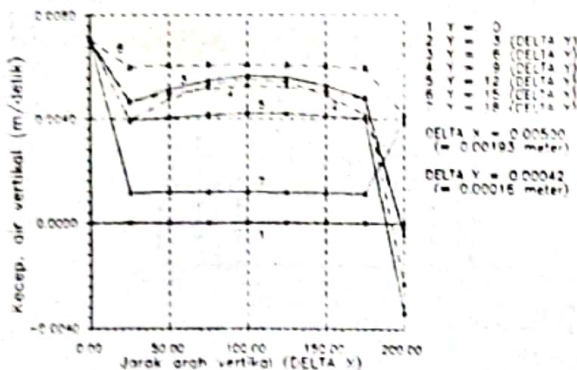
1. Sampai dengan harga $TAU (\tau) = 0,10000000$ belum diperoleh harga-harga distribusi suhu dan distribusi kecepatan air yang konvergen, karena harga-harga masih terus menerus berubah.



Gambar 5. Suhu air terhadap jarak vertikal (DELTA X) pada $\tau = 0,100$ ($t = 5,449875$ detik).



Gambar 7. Kecepatan air horisontal (V) terhadap jarak vertikal (DELTA X) pada $\tau = 0,100$ ($t = 5,449875$ detik).



Gambar 6. Kecepatan air (U) terhadap jarak vertikal (DELTA X) pada $\tau = 0,100$ ($t = 5,449875$ detik).

- Distribusi suhu pelet uraniumnya untuk arah vertikal mempunyai bentuk mendekati fungsi cosinus, kecuali pada pusat/tengah-tengah pelet suhunya tetap = 376°C (suhu awal, Gambar 3 : kurva no. 1). Untuk arah horisontal, distribusi suhunya menurun, lebih jauh dari pusat pelet, harganya lebih mengecil.
- Demikian juga distribusi suhu kelongsong SS-304 (Gambar 4) untuk arah vertikal

mempunyai bentuk fungsi cosinus. Untuk arah horisontal, distribusi suhunya menurun.

- Distribusi suhu airnya (Gambar 5) untuk arah vertikal juga masih mempunyai bentuk fungsi cosinus, kecuali pada daerah lebih jauh dari dinding luar kelongsong (kurva-kurva no. 4, 5, 6 dan 7), suhunya tetap = suhu awal yaitu = $40,250^\circ\text{C}$. Untuk arah horisontal, distribusi suhunya menurun menuju harga $40,250^\circ\text{C}$.
- Distribusi kecepatan air arah vertikal (Gambar 6), mula-mula = harga awal kecepatan (= $0,00707$ m/detik), kemudian turun, naik dan pada bagian atas tiba-tiba melonjak turun sehingga sampai mencapai harga minus. Harga kecepatan arah vertikal yang minus menunjukkan bahwa aliran air yang turun.
- Distribusi kecepatan air arah horisontal (Gambar 7) tidak teratur dan harganya ada yang minus. Harga yang minus menunjukkan arah aliran yang mendekati dinding elemen bakar. Ini dapat terjadi karena pada tempat itu suhu air lebih panas dari sekitarnya sehingga massa jenisnya lebih kecil, mengakibatkan air tersebut naik dan tempatnya diisi oleh molekul-molekul air yang lebih luar.

Dari hasil-hasil perhitungan ini dapat ditarik kesimpulan bahwa dalam menggunakan metode beda hingga (dalam hal ini metode Crank Nicolson) untuk menyelesaikan persa-

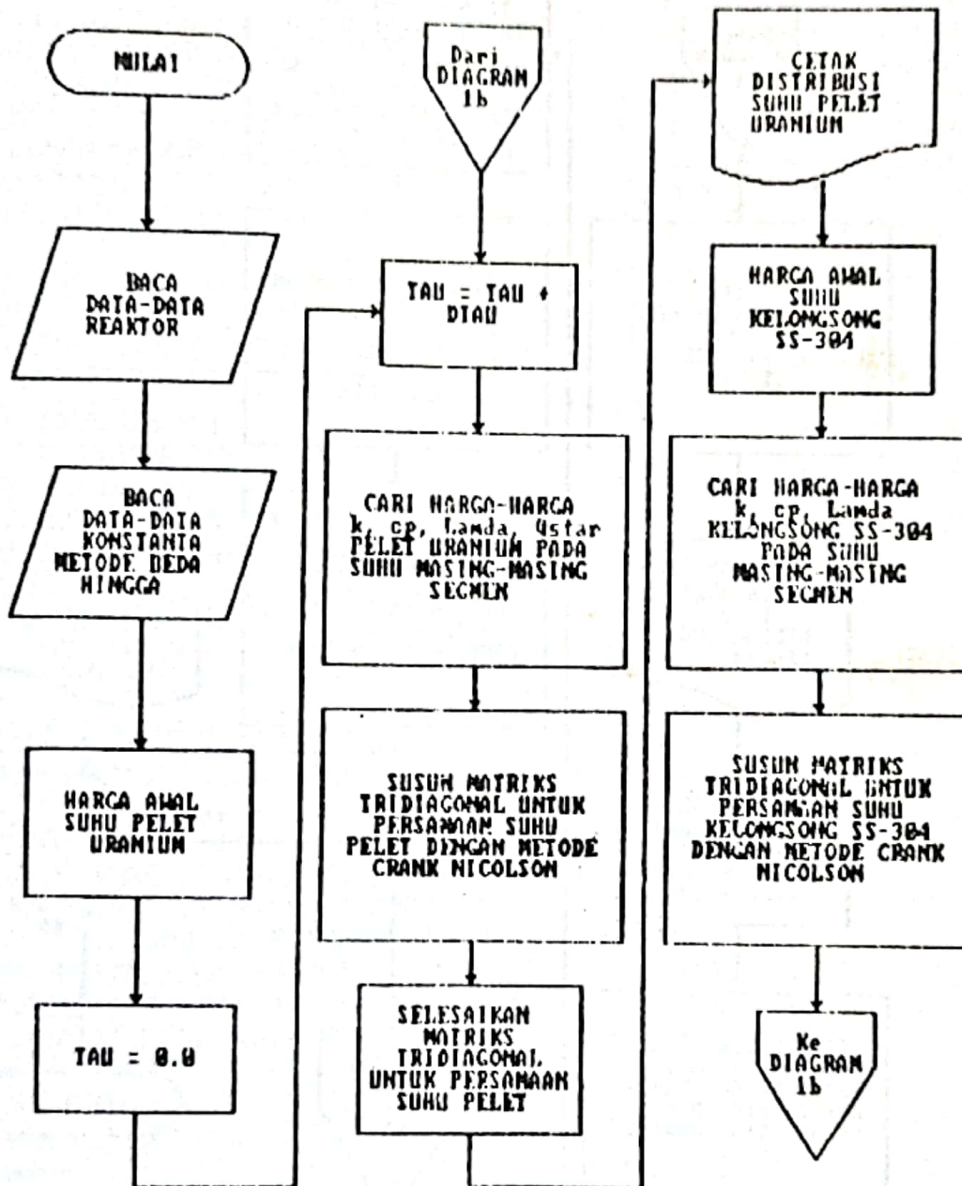


Diagram 1a. Diagram alir untuk program penyelesaian numerik persamaan model aliran air pendingin teras reaktor TRIGA MARK II.

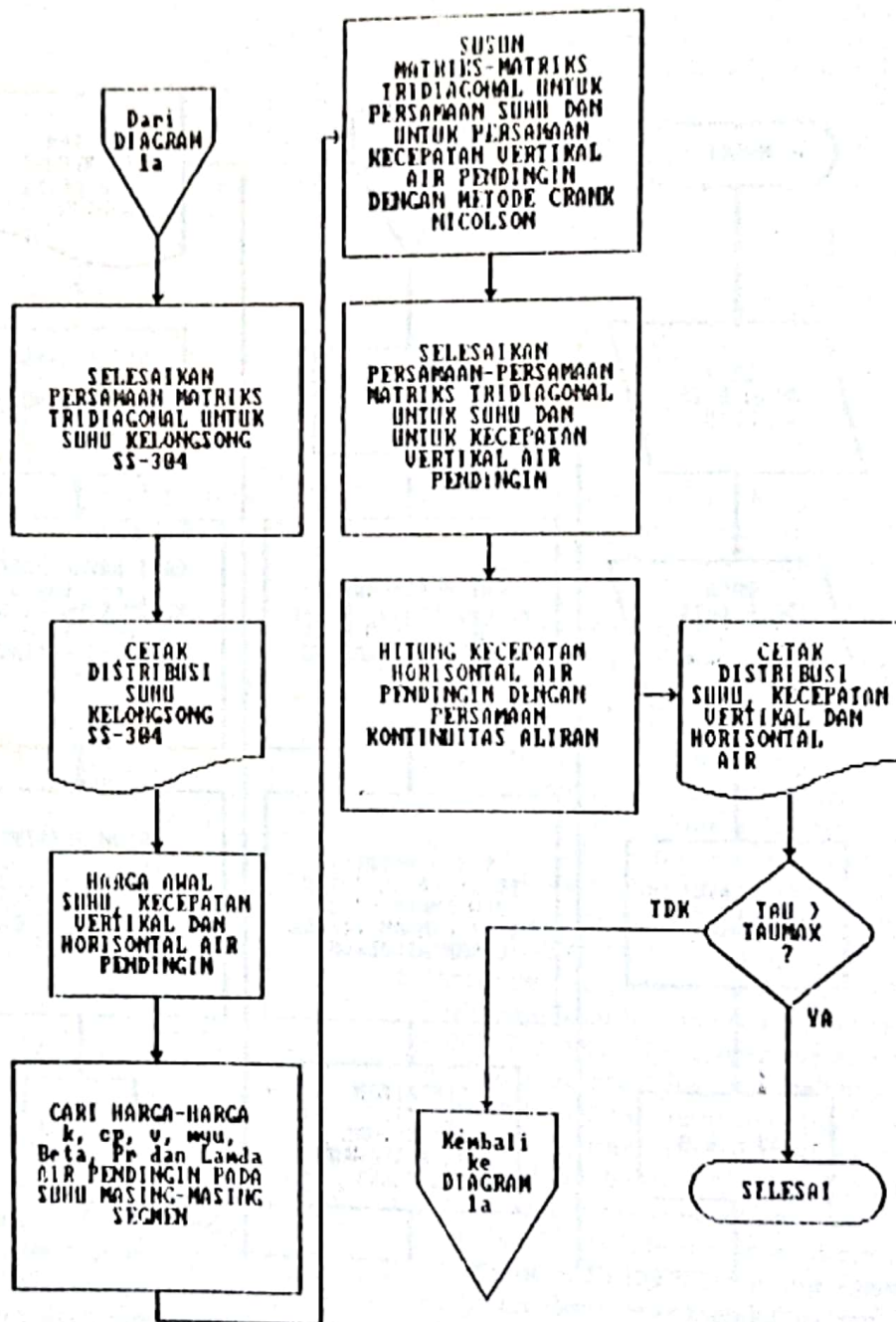


Diagram 1b. Diagram alir untuk program penyelesaian numerik persamaan model aliran air pendingin teras reaktor TRIGA MARK II.

Tabel 1. Hasil perhitungan numerik.

Data-data reaktor :

DAYA REAKTOR [Watt]	Q	=	700000,00000
JUMLAH ELEMEN BAKAR DLM TERAS	JEB	=	7,00000
PANJANG ELEMEN BAKAR [m]	L	=	0,385500
JARI-JARI PELET [m]	R1	=	0,018200
MASSA JENIS PELET URANIUM [kg/m ³]	ρ_U	=	19070,00000
JARI-JARI LUAR KELONGSONG [m]	R2	=	0,018700
TEBAL KELONGSONG [m]	TEBKEL	=	0,000373
MASSA JENIS KELONGSONG SS-304 [kg/m ³]	ρ_{SS}	=	7900,00000
JARI-JARI TANGKI REAKTOR [m]	RT	=	1,00000
PERCEPATAN GRAVITASI [m/detik ²]	g	=	9,80700

DATA-DATA AIR PENDINGIN TERAS REAKTOR :

SUHU AIR MASUK [°C]	T_{in}	=	38,50000
SUHU AIR KELUAR [°C]	T_{out}	=	42,00000
SUHU AIR BULK [°C]	T_{bulk}	=	40,25000
SUHU AIR RATA-RATA [°C]	T_{bar}	=	208,12500
LAJU ALIR AIR [m ³ /jam]	L.A.	=	80,00000
KECEPATAN AIR RATA-RATA [m/detik]	U_{bar}	=	0,00707
DIAM. HIDROLIK DI ANTARA EL. BAKAR [m]	D_h	=	0,00584

METODE BEDA HINGGA DENGAN :

BANYAKNYA DELTA X SEPANJANG ELEMEN BAKAR	(M)	=	200
BANYAKNYA DELTA Y1 PADA PELET URANIUM	(N1)	=	24
BANYAKNYA DELTA Y2 PD KELONGSONG SS-304	(N2)	=	12
BANYAKNYA DELTA Y3 PD LAPISAN BATAS	(N3)	=	18
X MAKSIMUM (PANJANG ELEMEN BAKAR)	XMAX	=	1,00000
Y MAKSIMUM (DALAM PELET URANIUM)	Y1MAX	=	0,04721
Y2 MAKSIMUM (DALAM KELONGSONG SS-304)	Y2MAX	=	0,00097
Y3 MAKSIMUM (DLM LAPISAN BATAS AIR)	Y3MAX	=	0,00757
ΔX	DX	=	0,00500
(Δx dalam meter)	DXDIM	=	0,00193)
$\Delta Y1$ (DALAM PELET URANIUM)	DY1	=	0,00197
($\Delta y1$ dalam meter)	DY1DIM	=	0,00076)
$\Delta Y2$ (DALAM KELONGS.SS-304)	DY2	=	0,00008
($\Delta y2$ dalam meter)	DY2DIM	=	0,00003)
$\Delta Y3$ (DALAM LAPISAN BATAS AIR)	DY3	=	0,00042
($\Delta y3$ dalam meter)	DY3DIM	=	0,00016)
Δt [tanpa dimensi]	DTAU	=	0,00500
(Δt dalam detik)	DELTT	=	0,27249)
SUHU PUSAT PELET URANIUM	T0	=	376,0000

aktor, hanya diperlukan *processing time* yang cukup lama dan harus dipilih harga Δt yang tidak menyebabkan hasil yang *overflow*.

Bidang Operasi Reaktor, sub Bidang Teknologi Reaktor yang telah membantu terlaksananya penelitian ini.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami ucapkan banyak terima kasih kepada rekan-rekan : sub Bidang Fisika Reaktor, sub

DAFTAR PUSTAKA

1. Laporan analisa keselamatan reaktor Triga Mark II 1000 kW, Badan Tenaga Atom Nasional - Pusat Penelitian Teknik Nuklir, Bandung (1984).
2. Aryadi Suwono dan Sugeng Santosa, Karakteristik aliran dan perpindahan panas antara fluida dan berkas pipa (model reaktor), Seminar Pendayagunaan Reaktor Nuklir untuk Kesejahteraan Masyarakat, PPTN-BATAN Bandung (26-27 September 1990).
3. Curtis, F. G., Applied Numerical Analysis, Addison-Wesley Publishing Company Inc., California (1973).
4. Frank Kreith dan Ir. Arko Prijono, Prinsip-prinsip Perpindahan Panas, Edisi ketiga, Penerbit Erlangga, Jakarta (1986).
5. Heddy Krishyana Suyarto dkk., Perhitungan distribusi suhu elemen bakar berbentuk silinder dengan konveksi alamiah, Disajikan dalam Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, Yogyakarta (20-22 Maret 1990).
6. Henky, P.R., Penelitian eksperimental pengaruh pemanasan pada laju aliran satu model reaktor nuklir, Tugas akhir Strata dua di Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Pasca Sarjana, Institut Teknologi Bandung, Bandung (1987).
7. Holman, J.P. dan Ir. E. Jasjfi MSc., Perpindahan Kalor, Edisi kelima, Penerbit Erlangga, Jakarta (1984).
8. Incropera, F.P. dan DeWitt, D.P., Fundamentals of heat and mass transfer, second edition, John Wiley & Sons, New York (1985).
9. Nogotov, E.F., Applications of numerical heat transfer, UNESCO, Paris (1978).
10. Sibony, M. and Mardon, J.Cl., Analyse numerique II : Approximations et equations differentielles, HERMANN, editeurs des sciences et des arts, Paris (1984).
11. Soekodijat, B. dkk., Analisis kasus konveksi alamiah pada teras reaktor, Seminar Reaktor Nuklir dalam Penelitian Sains dan Teknologi menuju era tinggal landas, Bandung (1991).

DISKUSI

Iyos Subki :

1. Bagaimana persamaan gandengan T dan aliran? (seluruh reaktor atau sebagian dari reaktor?). Syarat terbatas?
2. Apa tujuan penelitian?

B. Soekodijat :

1. Di sini yang ditinjau/dianalisis adalah sebuah elemen bakar dan air pendingin di sekelilingnya. Jadi bukan teras reaktor sebagai satu kesatuan. Syarat bebas : a. suhu pada pusat bakar. b. suhu pada air pendingin di antara dua elemen

Efrizon :

1. Apa arti kecepatan negatif?
2. Apa ada persyaratan khusus untuk menggabung persamaan konveksi pulsa dan konveksi alam dalam analisis dimensional?

B. Soekodijat :

1. Kecepatan negatif berarti : pada kecepatan komponen vertikal, berarti arah ke bawah/turun dan pada kecepatan komponen horisontal berarti arah ke dalam menuju elemen bakar.
2. Aliran air pendingin dalam teras reaktor TRIGA MARK II Bandung yang dominan adalah secara konveksi alamiah, tidak ada konveksi paksa.