

KINETIKA UNTUK REAKTOR CEPAT

Zaki Su'ud

Jurusan Fisika, FMIPA, ITB

Jl. Ganesha No. 10 Bandung, Telp. 022-250-0834, Fax 022-250-6452

ABSTRAK

KINETIKA UNTUK REAKTOR CEPAT. Dalam paper ini dibahas penurunan formulasi analisis kinetika reaktor untuk diadaptasikan pada kondisi reaktor cepat. Analisis dimulai dari persamaan difusi bergantung waktu, selanjutnya diterapkan pendekatan nodal sehingga didapat berbagai opsi aproksimasi seperti pendekatan quasistatik yang diperbaiki, pendekatan quasistatik, pendekatan adiabatik, dan pendekatan *point reactor model*. Untuk reaktor cepat dengan jarak bebas rata-rata neutron cukup besar pendekatan adiabatik memiliki akurasi yang cukup baik. Selanjutnya dibahas metode numerik yang digunakan untuk memecahkan kinetika reaktor dengan model pendekatan adiabatik ini. Tahap berikutnya adalah ekstensi analisis dengan melibatkan sistem lebih realistis yaitu dengan melibatkan sistem standar dalam reaktor cepat seperti antara lain kanal pendingin, tanki panas dan dingin, penukar panas dan pompa. Contoh hasil analisis diberikan dan dibahas.

Kata Kunci: kinetika reaktor, reaktor cepat, persamaan difusi

ABSTRACT

KINETICS FOR FAST REACTOR. In this paper derivation of nuclear reactor kinetics formulation for fast reactors is discussed. The analysis started with time dependent diffusion equation, which then used with nodal approximation. Then we discuss several option of approximation such as improved quasistatic approach, quasistatic approach, adiabatic approach, and point reactor models are also discussed. For fast reactors which has relatively long mean free path of neutron it is good enough to use adiabatic approximation for kinetic analysis. The next is numerical discussion to solve the adiabatic approach. We then extend discussion to real system which include coolant channel, hot and cool tanks, heat exchanger, pumping system, etc. Some calculational results are given and discussed.

Key Words: reactor kinetic, fast reactor, diffusion equation

I. Pendahuluan

Kinetika reaktor bergantung ruang dan waktu sangat penting peranannya untuk mengetahui keadaan reaktor pada saat terjadi kejadian di luar keadaan normal, terutama dengan masuknya sejumlah reaktivitas positif ke dalam teras reaktor. Untuk memecahkan permasalahan kinetika ini kita dapat berangkat dari persamaan difusi multigrup bergantung waktu yang kemudian kita terapkan pendekatan nodal. Pada implementasinya bergantung pada tingkat aproksimasi berikutnya kita dapat memperoleh model quasistatik yang diperbaiki (*improved quasystatic*) yaitu dengan menggunakan selang waktu perhitungan yang berbeda antara fungsi amplitudo dengan fungsi bentuk. Selanjutnya pendekatan quasistatik dilakukan dengan mengabaikan suku derivasi fungsi bentuk terhadap waktu maka kita peroleh pendekatan quasistatik. Bila kita mengaproksimasikan fungsi neutron tunda dengan selang waktu yang kita samakan dengan pada perhitungan waktu bentuk maka kita akan dapatkan pendekatan adiabatik. Sedang untuk model kinetika reaktor titik (*point reactor kinetic*) maka fungsi bentuknya hanya dihitung satu kali tepat sebelum transien mulai. Untuk reaktor cepat dengan kondisi jarak bebas rata-rata neutron yang besar maka pendekatan adiabatik memberikan hasil yang cukup akurat. Selanjutnya dirumuskan metode pemecahan numeriknya dan diberikan contoh hasilnya.

II. Formulasi Matematik

Kita berangkat dari persamaan difusi multigrup bergantung waktu sbb.

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial \phi(\vec{r}, t)}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot D_g(\vec{r}, t) \vec{\nabla} \phi_g(\vec{r}, t) - \Sigma_{rg}(\vec{r}, t) \phi_g(\vec{r}, t) + \chi_{pg} \sum_{g'=1}^G v_{p'} \Sigma_{f_{g'}}(\vec{r}, t) \phi_{g'}(\vec{r}, t) + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{sg' \rightarrow g}(\vec{r}, t) \phi_{g'}(\vec{r}, t) + \sum_{l=1}^6 \lambda_l \zeta_l \chi_g^{dl} \quad (1)$$

Dengan I = perubahan neutron setiap saat

II = perubahan neutron karena difusi

- III = perubahan neutron karena absorpsi
- IV = perubahan neutron karena sumber neutron
- V = perubahan neutron karena hamburan neutron yang masuk
- VI = perubahan neutron karena neutron tunda

Indeks p menyatakan neutron spontan (*prompt neutron*), sedang d menyatakan neutron tunda (*delayed neutron*).

Fungsi ζ_l adalah konsentrasi precursor neutron tunda.

dengan pendekatan nodal : $\phi_g(\vec{r}, t) = p(t)\psi_g(\vec{r}, t)$ (2)

substitusikan persamaan (2) pada persamaan (1) sehingga diperoleh persamaan (3)

$$\frac{1}{v_g} \frac{\partial p \psi_g}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot D_g(\vec{r}, t) \vec{\nabla} (p \psi_g) - \Sigma_{rg}(\vec{r}, t) p \psi_g + \chi_{pg} \sum_{k=1}^G v_p \Sigma_{fk}(\vec{r}, t) p \psi_k + \sum_{k=1}^G \Sigma_{gk \rightarrow g}(\vec{r}, t) p \psi_k + \sum_{l=1}^6 \lambda_l C_l \chi_k^{dl}$$

$$\frac{\psi_g}{v_g} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{p}{v_g} \frac{\partial \psi_g}{\partial t} = p \vec{\nabla} \cdot D_g(\vec{r}, t) \vec{\nabla} \psi_g - \Sigma_{rg}(\vec{r}, t) p \psi_g + p \chi_{pg} \sum_{k=1}^G v_p \Sigma_{fk}(\vec{r}, t) \psi_k + p \sum_{k=1}^G \Sigma_{gk \rightarrow g}(\vec{r}, t) \psi_k + \sum_{l=1}^6 \lambda_l C_l \chi_k^{dl}$$

(3)

Untuk memproses lebih lanjut persamaan di atas kita dapat memilih kendala (*constraint*) berikut ini

$$\sum_{g=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \frac{\psi_g^*(\vec{r}, 0) \psi_g(\vec{r}, t)}{v_g} dV = K, \Rightarrow \text{kons tan}$$

(4)

Kalikan persamaan (3) dengan fluks *adjoint* pada saat awal ($t = 0$) lalu integrasikan persamaan di atas secara spasial terhadap seluruh bagian reaktor dan kita jumlahkan terhadap seluruh grup energi kita peroleh

$$\begin{aligned}
 & \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) \frac{\psi_k}{v_k} \frac{\partial p}{\partial t} dV + \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) \frac{p}{v_k} \frac{\partial \psi_k}{\partial t} dV = \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) p \vec{\nabla} \cdot D_k(\vec{r},t) \vec{\nabla} \psi_k dV - \\
 & \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) \Sigma_{rk}(\vec{r},t) p \psi_k dV + \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) p \chi_{rk} \sum_{g'=1}^G v_p \Sigma_{fg'}(\vec{r},t) \psi_{g'} dV + \\
 & \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) p \sum_{g'=1}^G \Sigma_{gk \rightarrow g}(\vec{r},t) \psi_{g'} dV + \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) \sum_{l=1}^6 \lambda_l C_l \chi_k^{dl} dV
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

Kita keluarkan faktor-faktor yang tidak bergantung pada variabel spasial dari integral sehingga diperoleh persamaan (6)

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial p}{\partial t} \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) \frac{\psi_k}{v_k} dV + p \frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) \frac{\psi_k}{v_k} dV = p \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) \vec{\nabla} \cdot D_k(\vec{r},t) \vec{\nabla} \psi_k dV - \\
 & p \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) \Sigma_{rk}(\vec{r},t) \psi_k dV + p \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) \chi_{rk} \sum_{g'=1}^G v_p \Sigma_{fg'}(\vec{r},t) \psi_{g'} dV + \\
 & p \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) \sum_{g'=1}^G \Sigma_{gk \rightarrow g}(\vec{r},t) \psi_{g'} dV + \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) \sum_{l=1}^6 \lambda_l C_l \chi_k^{dl} dV
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

Dengan memasukkan kendala pada fungsi bentuk akan diperoleh persamaan (7)

$$\begin{aligned}
 & \frac{\partial p}{\partial t} K = p \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) \left\{ \chi_{rk} \sum_{g'=1}^G v_p \Sigma_{fg'}(\vec{r},t) \psi_{g'} + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{gk \rightarrow g}(\vec{r},t) \psi_{g'} + \vec{\nabla} \cdot D_k(\vec{r},t) \vec{\nabla} \psi_k - \Sigma_{rk}(\vec{r},t) \psi_k \right\} dV + \\
 & \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) \sum_{l=1}^6 \lambda_l C_l \chi_k^{dl} dV \\
 & \frac{\partial p}{\partial t} K = p \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) \left\{ \chi_{rk} \sum_{g'=1}^G v_p \Sigma_{fg'}(\vec{r},t) \psi_{g'} + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{gk \rightarrow g}(\vec{r},t) \psi_{g'} + \vec{\nabla} \cdot D_k(\vec{r},t) \vec{\nabla} \psi_k - \Sigma_{rk}(\vec{r},t) \psi_k \right\} dV - \\
 & p \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) \{ F_{kg} \psi_g \} dV + \sum_{k=1}^G \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_k(\vec{r},0) \sum_{l=1}^6 \lambda_l C_l \chi_k^{dl} dV
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Semua suku dibagi dengan sumber fisi, kemudian gunakan rumusan reaktivitas dari teori gangguan maka diperoleh

$$\frac{\partial p}{\partial t} \frac{K}{F(t)} = (\rho(t) - \beta) p + \frac{1}{F(t)} \sum_{g=1}^6 \int_{\text{seluruh reaktor}} \psi_g(\vec{r}, 0) \sum_{l=1}^6 \lambda_l \xi_l^g dV \quad (8)$$

$$\frac{dp}{dt} = \frac{(\rho(t) - \beta)}{\Lambda} p + \sum_{l=1}^6 \lambda_l C_l$$

dengan cara yang sama persamaan yang berhubungan dengan konsentrasi prekursor menjadi

$$\frac{dC_l}{dt} = -\lambda_l C_l + \frac{\beta_l}{\Lambda} p \quad (9)$$

Di sini

$$\beta_k(t) = \frac{1}{F(t)} \int \sum_{g=1}^G \Psi_g^*(r, 0) F_{d,k} \Psi_g(r, t) dV$$

$$\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i$$

$$\Lambda = \frac{1}{F(t)} \int \sum_{g=1}^G \Psi_g^*(r, 0) \left[\frac{1}{v_g} \right] \Psi_g(r, t) dV$$

$$\rho(t) = \int \sum_{g=1}^G \Psi_g^*(r, 0) \{ \Delta F_g - \Delta M_g \} \Psi_g(r, t) dV$$

(10)

Untuk fungsi bentuk:

$$\frac{\psi_g}{v_g} \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{p}{v_g} \frac{\partial \psi_g}{\partial t} = p \nabla \cdot D_g(r, t) \nabla \psi_g - \Sigma_{r,g}(r, t) p \psi_g + p \chi_{pg} \sum_{g'=1}^G v_{p'} \Sigma_{fg'}(r, t) \psi_{g'} + p \sum_{g'=1}^G \Sigma_{sg' \rightarrow g}(r, t) \psi_{g'} +$$

$$\sum_{l=1}^6 \lambda_l C_l \chi_l^g$$

(11)

Aproksimasi tahap pertama dapat dilakukan dengan mengubah selang waktu perhitungan untuk p dan ψ sbb.

$$\frac{\partial \psi_g}{\partial t} = \frac{1}{\Delta t_s} (\psi(r, E, t_s) - \psi(r, E, t_{s-1})) \quad (12)$$

Secara umum Δt_s dapat diambil jauh lebih besar dari pada Δt yang diambil untuk menghitung fungsi amplitudo $p(t)$. Substitusikan hal ini pada persamaan fungsi bentuk terakhir

$$\begin{aligned} \nabla \cdot D_g(r, t) \nabla \psi_g - \Sigma_{rg}(r, t) \psi_g + \chi_{pg} \sum_{g'=1}^G v_p \Sigma_{fg}(r, t) \psi_{g'} + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{sg' \rightarrow g}(r, t) \psi_{g'} - \frac{1}{v \Delta t_s} \psi_g(r, t_s) - \frac{\psi_g}{v p_g} \frac{\partial p}{\partial t} = \\ - \frac{1}{p} \sum_{l=1}^6 \lambda_l C_l \chi_g^{eff} - \frac{1}{v \Delta t_{s-1}} \psi_g(r, t_{s-1}) \end{aligned} \quad (13)$$

persamaan di atas adalah persamaan untuk mendapatkan fungsi bentuk bagi aproksimasi kuasistatik yang diperbaiki (*improved quasistatic*). Untuk pendekatan kuasistatik maka persamaan di atas berubah menjadi :

$$\nabla \cdot D_g(r, t) \nabla \psi_g - \Sigma_{rg}(r, t) \psi_g + \chi_{pg} \sum_{g'=1}^G v_p \Sigma_{fg}(r, t) \psi_{g'} + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{sg' \rightarrow g}(r, t) \psi_{g'} - \frac{\psi_g}{v p_g} \frac{\partial p}{\partial t} = - \frac{1}{p} \sum_{l=1}^6 \lambda_l C_l \chi_g^{eff} \quad (14)$$

dan untuk pendekatan adiabatik, yaitu dengan mengaproksimasi sumber neutron tunda dengan saat perhitungan fungsi bentuk dan dengan mengabaikan suku terakhir di ruas kiri maka kita dapatkan persamaan dalam bentuk nilai *eigen* sbb.

$$\nabla \cdot D_g(r, t) \nabla \psi_g - \Sigma_{rg}(r, t) \psi_g + \lambda \chi_g \sum_{g'=1}^G v_p \Sigma_{fg}(r, t) \psi_{g'} + \sum_{g'=1}^G \Sigma_{sg' \rightarrow g}(r, t) \psi_{g'} - \frac{\psi_g}{v p_g} \frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (15)$$

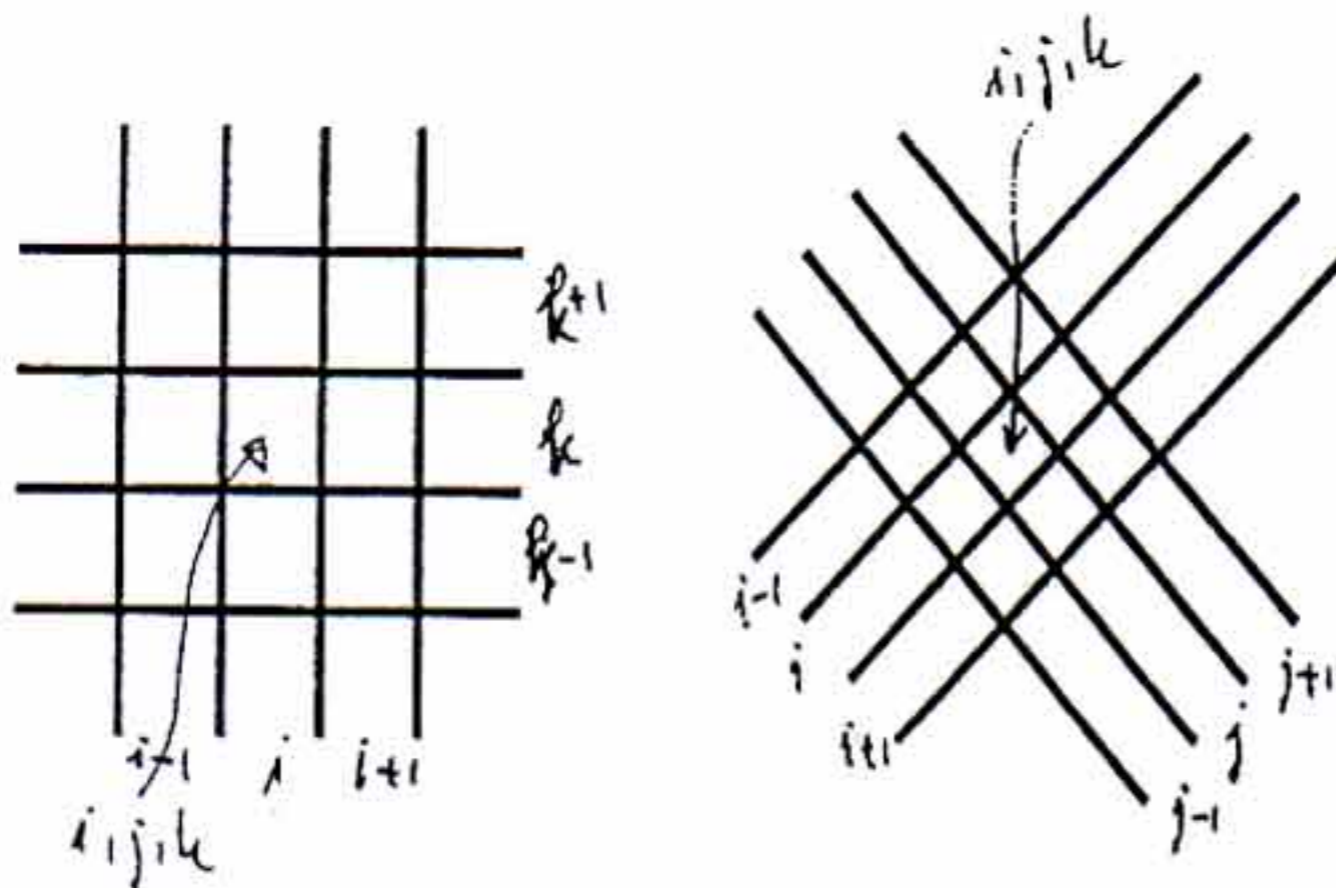
dengan λ adalah nilai *eigen*. Nilai *eigen* ini harus ditambahkan untuk memperoleh hasil yang non-trivial. Persamaan terakhir ini sebenarnya adalah persamaan difusi multigrup dalam keadaan tunak.

III. PEMECAHAN SECARA NUMERIK

Dengan menggunakan metode implisit penuh (*full implicit*) maka persamaan untuk fungsi amplitudo menjadi

$$\begin{aligned}
 p^{m+1} &= \frac{p^m + \sum_{r=1}^6 \frac{\lambda_r C_r \Delta t}{1 + \lambda_r \Delta t}}{1 - \underbrace{(p^m - \beta^m) \Delta t}_{\wedge} - \underbrace{\sum_{r=1}^6 \frac{\lambda_r \beta_r \Delta t^2}{1 + \lambda_r \Delta t}}_{\wedge}} \\
 C_o^{m+1} &= \frac{(C_o^m + \underbrace{\beta_r \Delta t}_{\wedge} p^{m+1})}{1 + \lambda_r \Delta t}
 \end{aligned}
 \tag{16}$$

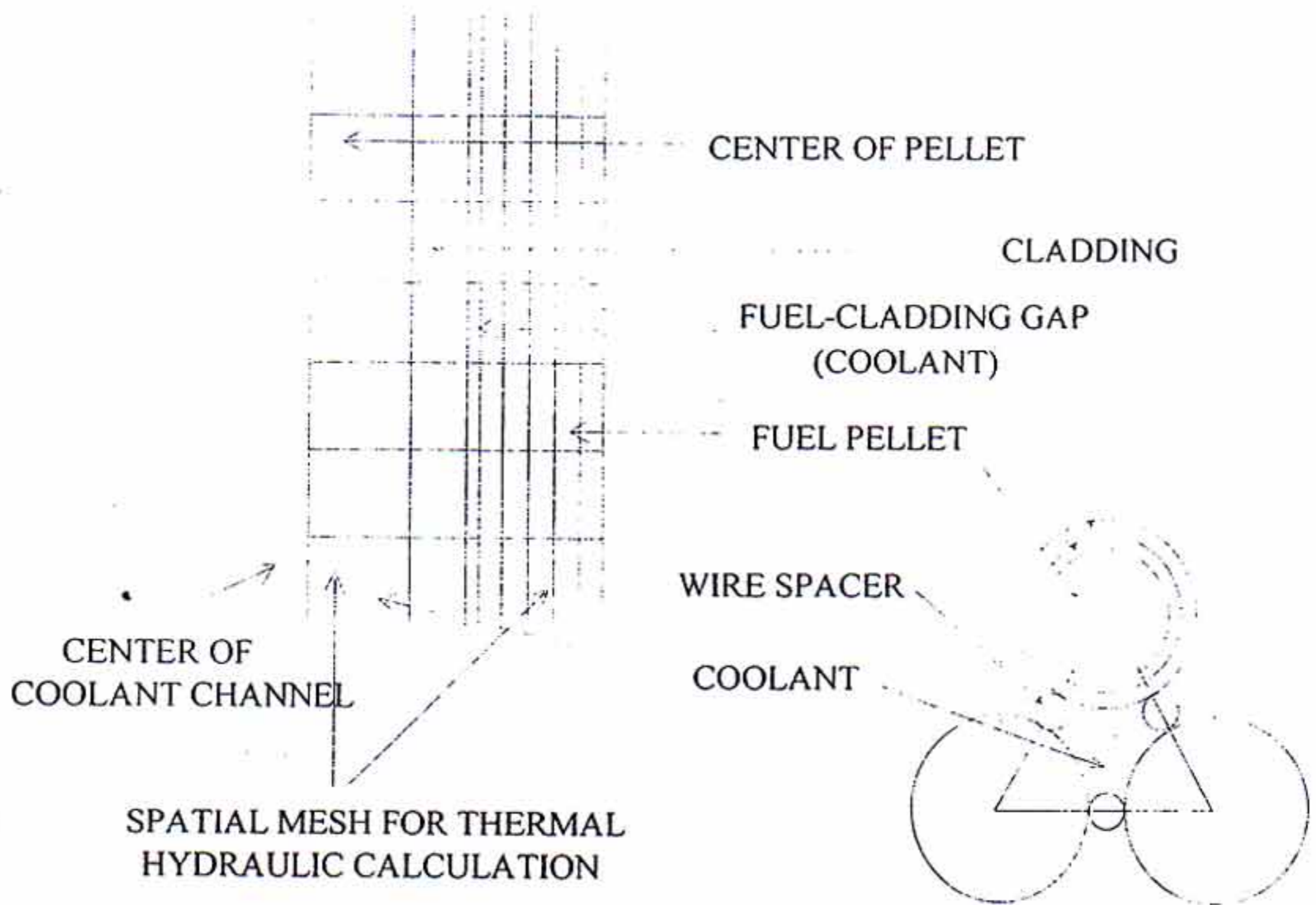
Selanjutnya untuk memecahkan fungsi bentuk dalam 3 dimensi kita gunakan diskritisasi sbb.



Setelah diskriminasi dalam koordinat x-y-z maka persamaan fungsi bentuk menjadi

$$\begin{aligned}
 & \Phi_g^{i+1,j,k} \left(-\frac{D^{i+1,j,k} A^{i+1,j,k}}{x^{i+1} - x^i} \right) + \Phi_g^{i,j+1,k} \left(-\frac{D^{i,j+1,k} A^{i,j+1,k}}{y^{j+1} - y^j} \right) + \Phi_g^{i,j,k+1} \left(-\frac{D^{i,j,k+1} A^{i,j,k+1}}{z^{k+1} - z^k} \right) + \\
 & \Phi_g^{i,j,k} \left(\frac{D^{i+1,j,k} A^{i+1,j,k}}{x^{i+1} - x^i} + \frac{D^{i,j+1,k} A^{i,j+1,k}}{y^{j+1} - y^j} + \frac{D^{i,j,k+1} A^{i,j,k+1}}{z^{k+1} - z^k} + \frac{D^{i-1,j,k} A^{i-1,j,k}}{x^i - x^{i-1}} + \right. \\
 & \left. \frac{D^{i,j-1,k} A^{i,j-1,k}}{y^j - y^{j-1}} + \frac{D^{i,j,k-1} A^{i,j,k-1}}{z^k - z^{k-1}} + \sum_{g'}^{i,j,k} V^{i,j,k} \right) + \\
 & \Phi_g^{i-1,j,k} \left(-\frac{D^{i-1,j,k} A^{i-1,j,k}}{x^i - x^{i-1}} \right) + \Phi_g^{i,j-1,k} \left(-\frac{D^{i,j-1,k} A^{i,j-1,k}}{y^j - y^{j-1}} \right) + \Phi_g^{i,j,k-1} \left(-\frac{D^{i,j,k-1} A^{i,j,k-1}}{z^k - z^{k-1}} \right) = \\
 & = \frac{\chi_g^{i,j,k}}{k_{eff}} \sum_{g'=1}^G \nu \sum_{g'}^{i,j,k} \Phi_g^{i,j,k} V^{i,j,k} + \sum_{g'=1}^G \sum_{g' \rightarrow g}^{i,j,k} \Phi_g^{i,j,k} V^{i,j,k}
 \end{aligned}$$

(17)



Gambar 1. Model kanal untuk perpindahan panas

Dengan menggunakan model Gambar 1, di atas maka persamaan termohidrolika yang relevan adalah Hukum kekekalan massa dan energi untuk pendingin di teras:

$$\frac{\rho_{ci,j,k}^{n+1} - \rho_{ci,j,k}^n}{\Delta t_n} = \frac{G_{i,j}^{k+1} - G_{i,j}^k}{\Delta Z_k}$$

$$\rho_c C_{p_i} \frac{T_{ci,j,k}^{n+1} - T_{ci,j,k}^n}{\Delta t} V_{i,j,k} = Q_{ci,j,k} V_{i,j,k} + K_{ci,j,k}^n A^{k+1/2} \frac{T_{ci,j,k+1}^n - T_{ci,j,k}^n}{Z^{k+1} - Z^k} -$$

$$K_{ci,j,k-1/2}^n A^{k-1/2} \frac{T_{ci,j,k}^n - T_{ci,j,k-1}^n}{Z^k - Z^{k-1}} - C_{p_i} G_{i,j,k} \frac{T_{ci,j,k}^n - T_{ci,j,k}^{n-1}}{\Delta Z_k} V_{i,j,k} T_{ci,j,k}^{n-1} =$$

$$\frac{\Delta t}{\rho_c C_{p_i} V_{i,j,k}} \left[\frac{Q_{ci,j,k} V_{i,j,k} + K_{ci,j,k+1/2}^n A_{i,j,k+1/2} \frac{T_{ci,j,k}^n - T_{ci,j,k}^n}{Z^{k+1} - Z^k} - K_{ci,j,k-1/2}^n A_{i,j,k-1/2} \frac{T_{ci,j,k}^n - T_{ci,j,k-1}^n}{Z^k - Z^{k-1}} - C_{p_i} G_{i,j,k} \frac{T_{ci,j,k}^n - T_{ci,j,k}^{n-1}}{\Delta Z_k} V_{i,j,k} \right] +$$

$$T_{ci,j,k}^n \quad (18)$$

Hukum kekekalan momentum untuk pendingin di teras

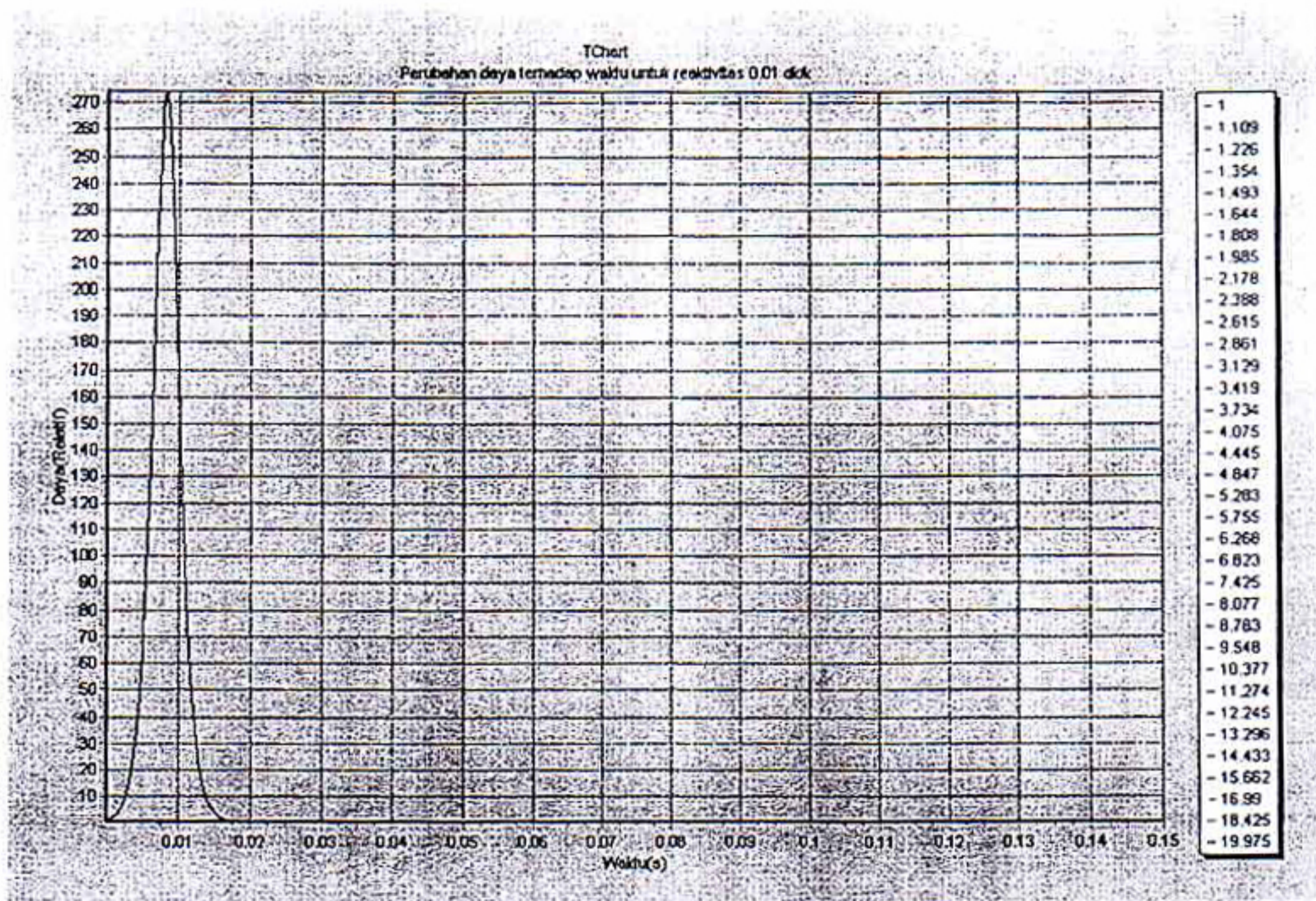
$$G_k^{n+1} = G_k^n + \Delta t \left[\frac{-\frac{G_{k+1}^n{}^2}{\rho_{k+1}} + \frac{G_k^n{}^2}{\rho_k}}{\Delta t_k} - \frac{P_{k+1} - P_k}{\Delta t_k} - \frac{G_k^n{}^2}{2D_c \rho_k} \frac{f_u}{\rho_k} - \rho_k \cdot g \right] \quad (19)$$

Persamaan konduksi panas bergantung waktu untuk pelet bahan bakar

$$\rho_f C_{pfl} \frac{T_{fl}^{n+1} - T_{fl}^n}{\Delta t} V_{k,l} = Q_{fl}^n V_{k,l} + \left\{ kf_l + \frac{1}{2} \frac{T_{fl+1}^{n+1} - T_{fl}^{n+1}}{\Gamma_{l+1} - \Gamma_l} A_{k,l+\frac{1}{2}} - kf_{l-\frac{1}{2}} \frac{T_{fl}^n - T_{fl-1}^n}{\Gamma_l - \Gamma_{l-1}} - A_{k,l-\frac{1}{2}} \right\} \quad (20)$$

IV. HASIL PERHITUNGAN

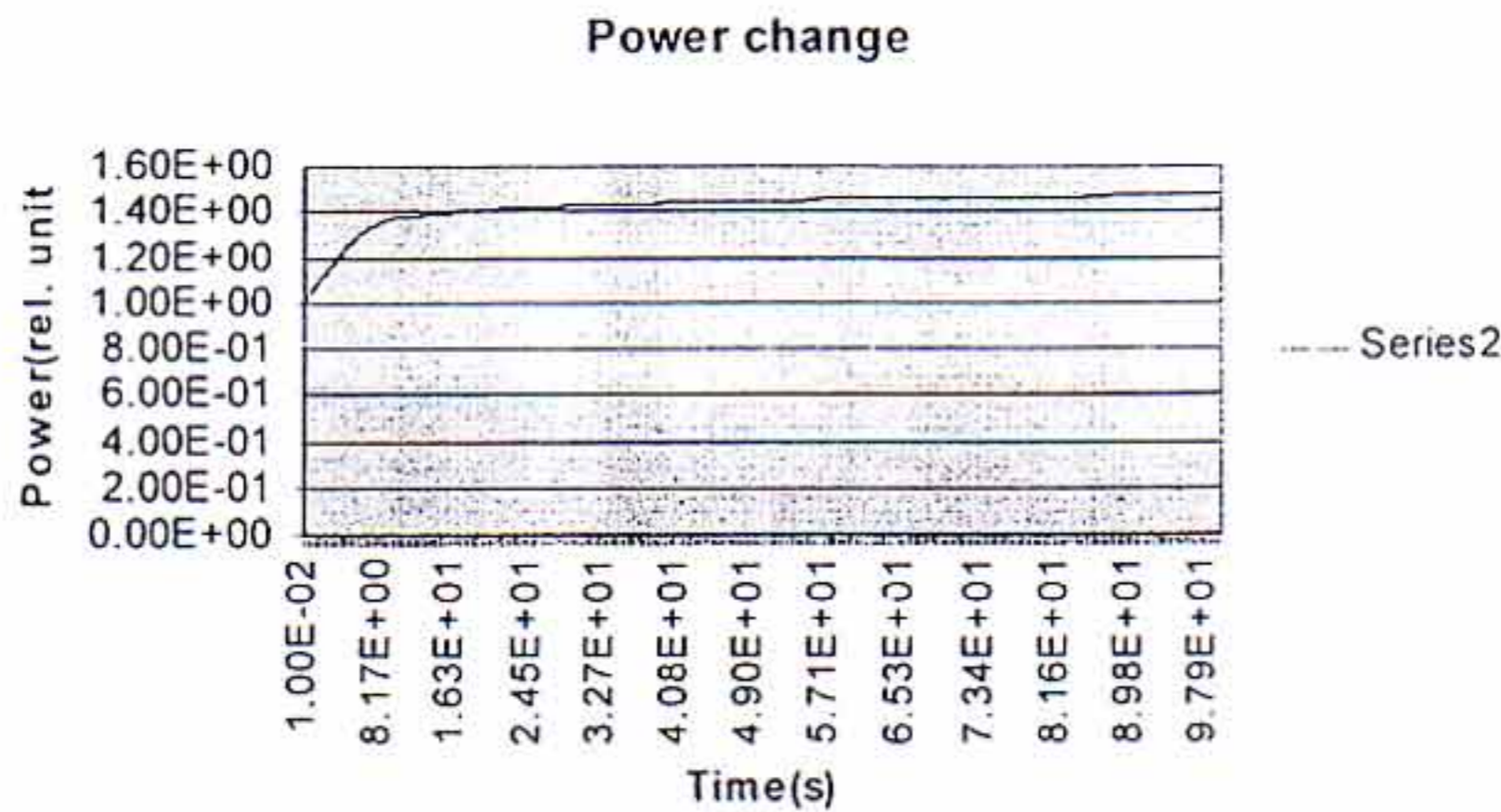
Transien dengan reaktivitas eksternal 0.01 untuk reaktor cepat berbasis plutonium



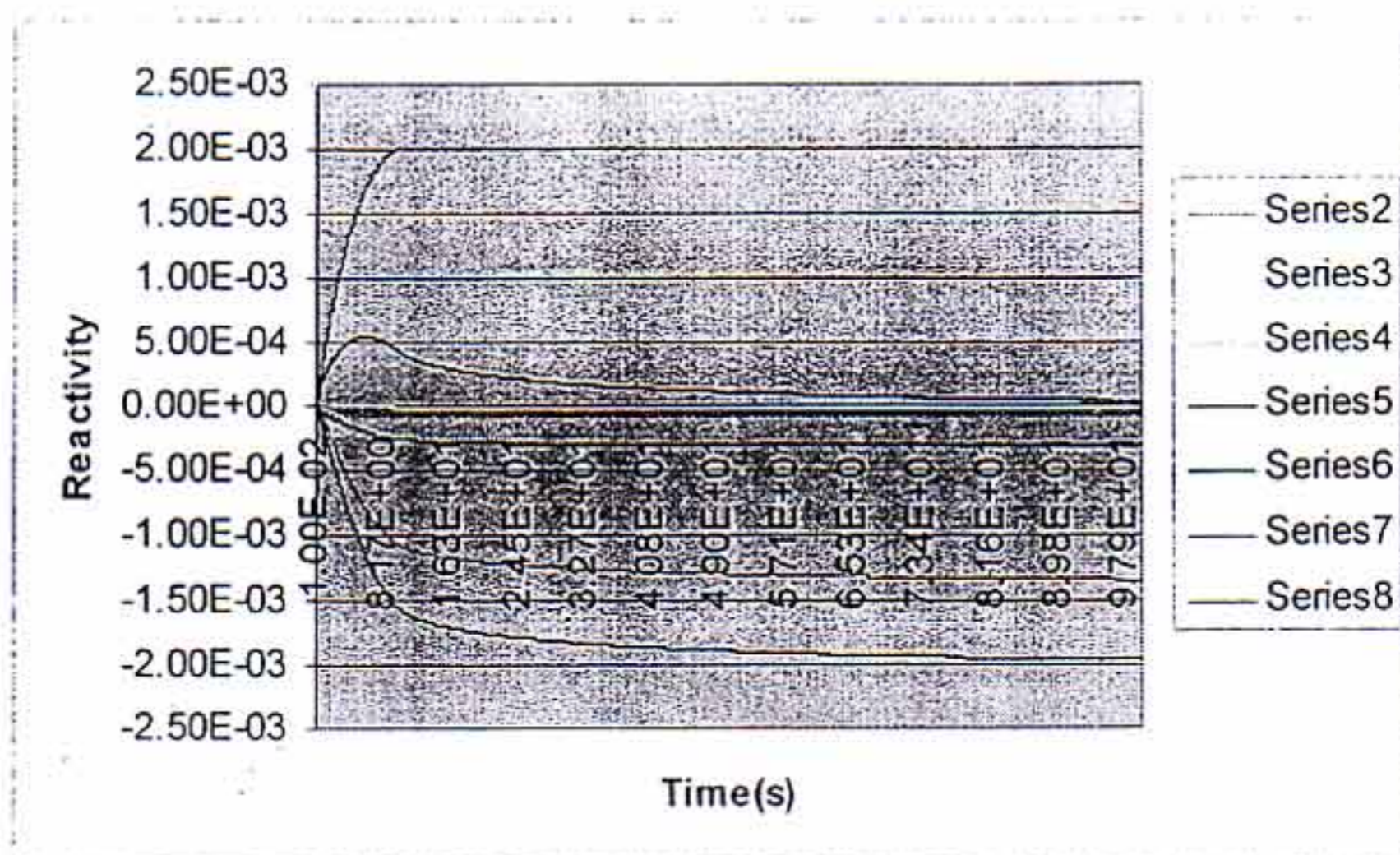
Gambar 2. Perbandingan daya terhadap waktu untuk eksperimen *super prompt critical*

Selanjutnya Gambar 2 berikut ini adalah perubahan daya terhadap waktu untuk transien yang mengikuti proses kecelakaan reaktivitas tanpa proteksi (*UTOP-unprotected transient over power*). Dan berikutnya adalah perubahan reaktivitasnya terhadap waktu. Untuk kecelakaan UTOP di sini grafik paling bawah adalah total *feedback*, selanjutnya ke atas berturut-turut: *Doppler*, *radial expansion*, *axial expansion* dan *coolant void coefficient*. Untuk daerah positif paling atas adalah *external reactivity*, selanjutnya adalah reaktivitas total (yaitu *feedback* total ditambahkan pada

reaktivitas eksternal). Tampak bahwa setelah sekitar sepuluh detik reaktivitas *feedback* telah dapat mengkompensasi reaktivitas eksternal sehingga daya menjadi praktis konstan.



Gambar 3. Perubahan daya terhadap waktu pada kecelakaan UTOP 0.2%dk/k (seluruh batang kendali)



Gambar 4. Perubahan reaktivitas terhadap waktu.

V. KESIMPULAN

Telah dijabarkan penurunan perumusan kinetika dari persamaan difusi bergantung waktu dan dirumuskan pemecahan numeriknya. Untuk reaktor cepat, model adiabatik memberikan hasil yang cukup akurat dalam analisis transien bergantung ruang dan waktu.

Penggunaan metode implisit akan memberikan stabilitas tinggi dalam pemecahan secara numerik.

VI DAFTAR PUSTAKA

1. ZAKI S, DAN H. SEKIMOTO, Nuclear Engineering and Design, 162(1996) p. 205-222.
2. ZAKI S. : "Design Study on Lead and Lead-bismuth Cooled Long Life Small Fast Reactor "(dalam bahasa jepang), Disertasi, TIT, 1995.
1. COFFIELD, R.D. et al, Nuclear Engineering and Design, 62(1980) p. 181-198.
2. CHENG, S.K, TODREAS, Nuclear Engineering and Design, 92(1986), p.227.
3. OTT, K. O, et al., Nuclear Science and Engineering, 36(1969), p. 402.
4. GUPPY J.G., " Super System Code(SSC)", NUREG/CR-3169,1993.
5. Seri paper tentang test EBR-II di Nuclear Engineering and Design, tahun I: 1986-1987.