BAB II

DASAR TEORI

2.1. Interaksi Neutron-Materi

Neutron merupakan salah satu partikel penyusun inti yang dilambangkan dengan [$_0n^1$] dan juga dikenal sebagai partikel tanpa muatan dengan massa diam sebesar 1,0087 satuan massa atom (Prayoto,1978). Karena neutron merupakan partikel tanpa muatan, maka apabila menembus materi tanpa dipengaruhi oleh gaya Coulomb. Kalau suatu neutron bergerak mendekati suatu inti atom dan memasuki daerah pengaruhnya, maka ada beberapa kemungkinan yang terjadi, neutron tadi hanya dibelokkan arahnya saja dan peristiwa semacam ini disebut reaksi hamburan (*Scattering)*, atau neutron tersebut masuk ke dalam inti atom dan biasa disebut reaksi tangkapan neutron.

Hamburan adalah sebuah proses yang hasil akhirnya hanyalah merupakan pemindahan energi dari suatu partikel (inti) ke pertikel lainnya (Glasstone dan Milton, 1978). Proses hamburan biasanya terjadi pada neturon cepat. Secara umum peristiwa hamburan digolongkan menjadi 2 jenis, yaitu : Hamburan lenting (*elastis*) dan tak lenting (*inelastis*) (Prayoto,1978) :

a. Hamburan lenting (*elastis*)

Hamburan lenting adalah proses tumbukan antara neutron dan inti target yang terjadi sedemikian sehingga tidak terjadi perubahan momentum dan energi kinetik neutron setelah proses. Atau dengan kata lain jumlah tenaga gerak dari neutron dan inti atom sebelum dan sesudah reaksi tumbukan tidak berubah.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

b. Hamburan tak lenting (*inelastic*)

Dalam reaksi hamburan tak lenting, meskipun jumlah tenaga dari sistem tumbukan tidak berubah, jumlah tenaga gerak sesudah tumbukan lebih kecil dari jumlah tenaga gerak sebelum tumbukan. Sebagian dari tenaga gerak dipakai untuk merangsang inti atom yang ditumbuk ke tingkat tenaga yang lebih tinggi. Karena pada tingkat tenaga yang lebih tinggi ini tidak mantap, maka inti atom yang ditumbuk kemudian akan kembali ke tingkat tenaga dasar sambil memancarkan radiasi γ.

Kemungkinan lainnya, yaitu neutron betul-betul masuk ke dalam inti atom dan tidak lagi merupakan badan yang berdiri sendiri. Peristiwa ini disebut reaksi absorpsi atau reaksi serapan neutron ataupun reaksi tangkapan neutron. Proses tangkapan neutron yang terjadi pada nutron lambat ini dibagi dalam tiga jenis, yaitu pemancaran sinar gamma (n,γ), pelontaran partikel bermuatan (n,α), (n,p), dan reaksi fisi (n,f). Pada proses tangkapan ini dikenal istilah tangkapan radiatif yang didefinisikan sebagai semua reaksi yang ditimbulkan oleh tangkapan neutron dan tidak mengalami pembelahan.

Reaksi pemancaran sinar gamma (n,γ) termasuk ke dalam tangkapan radiatif. Pada reaksi ini neutron ditangkap oleh bangun inti dan menyebabkan inti kelebihan energi. Kelebihan energi ini kemudian dipancarkan dalam bentuk sinar γ, sehingga inti kembali normal atau *ground state*.

Proses pemancaran sinar gamma diitunjukkan sebagai (Glasstone dan Milton, 1963):

$$Z^{A} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow \left[Z^{A+1}\right] \longrightarrow Z^{A+1} + {}_{0}\gamma^{0} \qquad \text{(R-3)}$$

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Contohnya reaksi :

$$_{92}U^{238} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{92}U^{239} + {}_{0}\gamma^{0} \qquad \text{(R-4)}$$

Reaksi neutron lambat disertai oleh pemancaran partikel bermuatan seperti alpha dan proton. Pada reaksi ini untuk dapat keluar dari inti, partikel bermuatan harus mempunyai energi yang cukup untuk mengatasi rintangan potensial *(potensial barrier)*. Sebagian energi itu diperoleh dari neutron yang ditangkap. Contoh reaksi pemancaran partikel bermuatan adalah reaksi (n,α) dan reaksi (n,p). Reaksi (n, α) dapat ditulis menjadi (Glasstone dan milton, 1963):

$$Z^{A} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow \left[Z^{A+1}\right]^{*} \longrightarrow [Z-2]^{A-3} + {}_{2}He^{4} \qquad \text{(R-5)}$$

Contohnya reaksi :

$$_{5}B^{10} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{3}Li^{7} + {}_{2}He^{4} \qquad \text{(R-6)}$$

Sedangkan reaksi (n,p) dapat ditulis menjadi :

$$Z^{A} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow \left[Z^{A+1}\right]^{*} \longrightarrow [Z-1]^{A} + {}_{1}H^{1} \qquad \text{(R-7)}$$

Contohnya reaksi :

$$_{7}N^{14} + {}_{0}n^{1} \longrightarrow {}_{6}C^{14} + {}_{1}H^{1} \qquad \text{(R-8)}$$

Reaksi fisi (n,f) terjadi jika bahan dapat belah yang berfungsi sebagai bahan bakar bereaksi dengan neutron termal. Di alam hanya dijumpai satu macam isotop yang dapat membelah dengan neutron bertenaga rendah yaitu U^{235}. Unsur uranium yang terdapat di alam sebagian besar tersusun oleh isotop U^{238} yaitu sebanyak 99,3 %. Sedangkan kadar isotop U^{235} dalam uranium alam hanyalah 0,7 % saja. Disamping U^{235} ada unsur buatan yang dapat membelah dengan neutron lambat yaitu U^{233} dan Pu^{239}, masing-masing dapat diperoleh dari reaksi tangkapan neutron pada isotop-isotop Th^{232} dan U^{238}.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Pada reaksi fisi dihasilkan inti majemuk, neutron-neutron baru dan sejumlah energi (200 MeV). Neutron-neutron baru hasil fisi ini kemudian mengalami proses perlambatan dan menjadi neutron termal.

Inti majemuk yang dihasilkan pada reaksi pembelahan bersifat tidak stabil dan dalam waktu singkat membelah menghasilkan bermacam-macam kombinasi hasil belah. Salah satu contoh proses pembelahan yang menghasilkan bermacam-macam kombinasi hasil belah dari inti U^{235} adalah sebagai berikut :

$$U^{235} + {}_0n^1 \longrightarrow \left[{}_{92}U^{236}\right]^* \longrightarrow {}_{38}Sr^{94} + {}_{54}Xe^{140} + 2\ {}_0n^1 \qquad \text{(R-9)}$$

Selanjutnya diikuti peluruhan inti ${}_{54}Xe$ dan ${}_{38}Sr$ pada reaksi diatas :

$${}_{54}Xe^{140} \longrightarrow {}_{55}Cs^{140} + \beta + \alpha \qquad \text{(R-10)}$$

$${}_{55}Cs^{140} \longrightarrow {}_{56}Ba^{140} + \beta + \alpha$$

$${}_{56}Ba^{140} \longrightarrow {}_{57}La^{140} + \beta + \alpha$$

$${}_{57}La^{140} \longrightarrow {}_{58}Ce^{140} + \beta + \alpha \qquad \text{(R-11)}$$

$${}_{38}Sr^{94} \longrightarrow {}_{39}Y^{94} + \beta + \alpha \qquad \text{(R-12)}$$

$${}_{39}Y^{94} \longrightarrow {}_{40}Zr^{94} + \beta + \alpha \qquad \text{(R-13)}$$

Seperti yang terlihat dalam reaksi diatas, hasil fisi U^{235} terdiri dari dua inti hasil belah. Inti hasil belah ini merupakan inti tidak stabil. Untuk menjadi stabil inti tersebut meluruh dengan memancarkan sinar-sinar atau partikel radioaktif.

2.2. Persamaan Diffusi Neutron

Salah satu konsep yang penting dalam teori reaktor adalah konsep keseimbangan neutron. Persamaan umum keseimbangan neutron adalah (Glasstone dan Milton , 1963) :

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id).

$$\text{Produksi - bocor - penyerapan} = \frac{\partial n}{\partial t} \qquad (2.1)$$

Dengan $\frac{\partial n}{\partial t}$ adalah laju perubahan densitas neutron. Untuk reaktor kritis jumlah neutron dalam reaktor tidak berubah. Sehingga laju produksi neutron harus seimbang dengan laju hilangnya neutron, maka (Prayoto, 1975):

$$\text{Produksi} = \text{bocor} + \text{penyerapan} \qquad (2.2)$$

Laju neutron yang bocor diungkapkan dalam neutron per cm^2 per detik diberikan oleh $-D\nabla^2\phi$. Jumlah neutron yang diserap per cm^3 per detik adalah $\Sigma_a\phi$, dengan Σ_a adalah tampang lintang serapan makroskopis, dan S melambangkan laju produksi neutron, sehingga persamaan (2.2) dapat ditulis menjadi :

$$D\nabla^2\phi - \Sigma_a\phi + S = 0 \qquad (2.3)$$

Jika faktor perlipatan tak hingga adalah k_∞, maka kecepatan produksi (S) neutron dalam unsur volume dxdydz adalah (Prayoto, 1975):

$$S = k_\infty \phi \Sigma_a \qquad (2.4)$$

Dengan :

$$k_\infty = f.n.\in.p$$

Apabila persamaan (2.4) disubstitusikan ke persamaan (2.3) diperoleh apa yang disebut dengan persamaan diffusi untuk keadaan seimbang yaitu :

$$D\nabla^2\phi - \Sigma_a\phi + k_\infty \phi \Sigma_a = 0 \qquad (2.5)$$

$$D\nabla^2\phi + (k_\infty - 1)\Sigma_a\phi = 0 \qquad (2.6)$$

Dalam bentuk lain persamaan (2.6) dapat ditulis sebagai (Prayoto, 1975) :

$$\nabla^2\phi + B_m^2\phi = 0 \qquad (2.7)$$

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

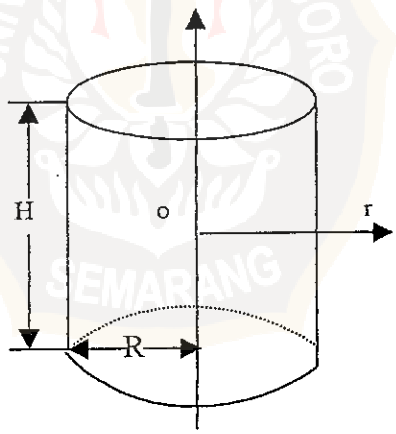
Dengan :

$$B_m^2 = \frac{\Sigma_a}{D} (k_\infty - 1)$$

∇^2 adalah operator laplace, ϕ adalah fluks neutron, dan D adalah koefisien absorpsi.

Besaran B_m^2 dalam persamaan (2.7) menentukan bentuk kelengkungan fungsi distribusi fluks neutron dalam reaktor, dan disebut *Buckling* (kelengkungan) dari reaktor. Karena besaran ini hanya tergantung pada sifat bahan-bahan yang ada dalam reaktor maka disebut buckling bahan atau *buckling material*.

Persamaan (2.6) dapat digunakan untuk menentukan distribusi fluks neutron dalam reaktor. Untuk reaktor yang berbentuk silinder distribusi fluks neutron ditentukan dalam arah axial dan radial.



Gambar (2-2) : Reaktor bentuk silinder

Persamaan distribusi fluks neutron untuk arah radial adalah (Prayoto, 1975) :

$$\phi(r) = A J_0 \left[\frac{2{,}405r}{R}\right] \qquad (2.8)$$

dengan J_0 adalah fungsi bessel orde nol.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Dan distribusi neutron untuk arah axial dapat ditentukan dengan persamaan :

$$\phi(z) = C \cos \frac{\pi z}{H} \tag{2.9}$$

Dengan C adalah sebuah konstanta.

Maka dengan mensubstitusikan persamaan (2.8) ke persamaan (2.9) diperoleh distribusi fluks neutron arah axial dan radial untuk reaktor kritis sebagai berikut :

$$\phi(r,z) = A J_0 \left[\frac{2{,}405r}{R}\right] \cos \frac{\pi z}{H} \tag{2.10}$$

Dengan R adalah jari-jari reaktor

H adalah tinggi reaktor

Apabila z dan r ditentukan maka data distribusi fluks neutron dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan diatas.

2.3. Kinetika Reaktor

2.3.1. Riwayat Hidup Neutron

Pada reaktor termal, neutron akan mengalami proses moderasi sebelum menimbulkan reaksi fisi tahap berikutnya. Proses moderasi terdiri dari dua proses yaitu proses moderasi dan proses termalisasi (Andang, 1990) :

1. <u>Proses moderasi</u> : yaitu proses penurunan tenaga neutron dari tenaga pembelahan sebesar kurang lebih 2 MeV sampai mencapai 1 eV. Penurunan ini terjadi karena tumbukan neutron dengan atom-atom moderator. Selama proses ini energi neutron jauh lebih tinggi dari energi gerak dan energi ikat atom-atom moderator. Sehingga energi gerak dan energi ikat atom-atom moderator

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

diabaikan terhadap energi neutron. Oleh sebab itu selama proses moderasi neutron akan mengalami penurunan energi dalam setiap tumbukan.

2. Proses termalisasi : yaitu proses yang terjadi pada tenaga antara 1 eV sampai 0,0235 eV. Pada tenaga ini, energi gerak maupun energi ikat atom-atom tak dapat diabaikan terhadap energi neutron, sehingga dalam suatu tumbukan neutron dapat turun atau justru naik energinya.

Setelah neutron menjadi neutron termal, neutron akan terserap baik oleh bahan bakar maupun oleh material-material lain. Jika dianggap bahwa teras hanya terdiri dari bahan bakar dan moderator saja, maka dapat didefinisikan f (faktor penggunaan termal) sebagai perbandingan antara serapan oleh bahan bakar terhadap serapan total yang dapat ditulis sebagai berikut:

$$f = \frac{\text{serapan oleh bahan bakar}}{\text{serapan oleh bahan bakar} + \text{serapan oleh moderator}} \qquad (2.11)$$

atau dengan kata lain faktor penggunaan termal (f), yaitu fraksi dari semua neutron termis yang diserap dalam bahan bakar.

Jadi dari n_0 buah neutron termis yang diserap dalam reaktor, hanyalah $n_0 \cdot f$ diantaranya yang diserap dalam bahan bakar, sedangkan sisanya yaitu $n_0 \cdot (1-f)$ diserap dalam bahan-bahan yang bukan bahan bakar (Prayoto, 1975).

Tidak semua reaksi serapan dalam bahan bakar akan menyebabkan terjadinya reaksi pembelahan, ada yang hanya menghasilkan tangkapan radiasi. Sehingga peluang serapan yang menghasilkan fisi sebanding dengan serapan total ialah Σ_f / Σ_a, dengan Σ_f adalah tampang lintang fisi makroskopis sedangkan Σ_a adalah tampang lintang serapan makroskopis. Selanjutnya setiap reaksi fisi akan menghasilkan neutron baru. Didefinisikan ν sebagai jumlah neutron rata-rata yang

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

dihasilkan setiap reaksi fisi. Maka setiap serapan satu neutron termal akan menghasilkan η neutron baru (cepat) dan berlaku :

$$\eta = \nu \frac{\Sigma_f}{\Sigma_a} \qquad (2.12)$$

Oleh karena itu dari reaksi pembelahan termis yang ditimbulkan oleh penyerapan n_0 . f buah neutron termis dalam bahan bakar akan dihasilkan n_0 . f . η buah neutron baru .

Tidak semua reaksi pembelahan yang terjadi dalam reaktor ditimbulkan oleh neutron termis karena meskipun kecil bahan bakar masih mempunyai tampang inti pembelahan terhadap neutron cepat (Prayoto, 1975). Kalau semua reaksi pembelahan yang ditimbulkan oleh semua neutron yang tenaganya di atas tenaga termis disebut pembelahan cepat, maka dapat didefinisikan faktor pembelahan cepat ε sebagai berikut :

$$\varepsilon = \frac{\text{pembelahan cepat} + \text{pembelahan termis}}{\text{pembelahan termis}} \qquad (2.13)$$

karena adanya reaksi pembelahan cepat ini maka banyaknya neutron yang dihasilkan dalam seluruh reaksi pembelahan menjadi n_0. f. η. ε.

Selama proses perlambatan neutron menuju neutron termis, ada sebagian dari neutron yang sempat bocor keluar dari reaktor, bila didefinisikan L_f adalah kebolehjadian tidak bocor sebagai neutron cepat, maka diantara n_0. f. η. ε neutron cepat hasil reaksi pembelahan diatas, sebagian diantaranya yaitu n_0. f. η. ε. (1-L_f) akan bocor keluar dari reaktor selama proses perlambatan. Selebihnya yaitu n_0. f. η. ε. L_f akan mengalami proses perlambatan sampai mencapai neutron termis. Tetapi oleh karena adanya absorpsi resonansi oleh inti-inti atom U^{238} yang

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

ada dalam bahan bakar, maka hanya sebagian diantaranya yang betul-betul dapat mencapai tenaga termis. Kalau didefinisikan p adalah kebolehjadian bebas resonansi maka banyaknya neutron yang betul-betul dapat mencapai tenaga termis adalah n_0. f. η. ε. p. L_f . Neutron-neutron termis ini kemudian mengalami proses diffusi dalam medium reaktor hingga akhirnya diserap oleh salah satu inti atom dalam medium. Selama proses diffusi sebagian dari neutron termis di atas sempat bocor keluar dari dinding-dinding reaktor. Kalau didefinisikan L_s adalah kebolehjadian tidak bocor sebagai neutron termis, maka banyaknya neutron termis yang betul-betul tersedia untuk diserap dalam medium reaktor adalah n_0. f. η. ε. p. L_f. L_s. Jadi dari n_0 buah neutron termis yang semula diserap dalam reaktor selama satu generasi telah berubah menjadi n_0. f. η. ε. p. L_f. L_s neutron termis baru yang tersedia untuk diserap lagi dalam generasi selanjutnya. Perbandingan jumlah neutron pada satu generasi dengan jumlahnya pada generasi sebelumnya disebut faktor perlipatan effektif K_{eff} , yaitu (Prayoto , 1975) :

$$K_{eff} = n_0 . f . \eta . \varepsilon . p . L_f . L_s \qquad (2.14)$$

2.3.2. Kekritisan Reaktor

Perubahan daya reaktor berdasarkan pada perubahan faktor perlipatan sebagai fungsi eksponensial. Panas yang dibangkitkan di dalam teras reaktor berbanding lurus dengan banyaknya pembelahan per detik, dimana sebanding pula dengan besarnya fluks neutron dalam teras.

Reaktor dapat bertahan kritis bila bahan dapat belah yang terdapat dalam teras telah melebihi massa kritisnya. Massa kritis didefinisikan sebagai jumlah bahan

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

dapat belah (fisil) yang terdapat di reaktor yang dapat memberikan berlangsungnya reaksi berantai secara kontinu tanpa adanya sumber dari luar. Pada saat kritis jumlah neutron yang diproduksi sama dengan jumlah neutron yang di absorpsi dan hilang dari sistem (Heru, 1982). Sedangkan menurut Sutaryo (1978), kondisi kritis adalah bahwa sistem reaktor tersebut dapat melanjutkan reaksi berantai secara konstan (jumlah neutron tetap).

Pokok persoalan kinetika reaktor berisi satu parameter yaitu faktor perlipatan. Seperti yang telah dijelaskan diatas, bahwa faktor perlipatan effektif didefinisikan sebagai perbandingan jumlah neutron yang diproduksi dengan jumlah neutron yang diserap dan hilang dari sistem atau perbandingan jumlah neutron pada satu generasi dengan jumlah neutron pada generasi sebelumnya.

Menurut Sutaryo (1978), karena daya reaktor sebanding dengan fluks neutron, maka pangaturan daya reaktor dapat tercapai dengan jalan mengatur faktor perlipatan effektif. Jika faktor perlipatan effektif lebih dari satu ($K_{eff} > 1$), maka reaktor dalam kondisi superkritis dan daya reaktor akan naik. Jika faktor perlipatan effektif diatur tepat sama dengan satu ($K_{eff} = 1$), maka reaktor kritis dan daya reaktor tetap tidak berubah. Sedangkan jika faktor perlipatan effektif dibuat kurang dari satu ($K_{eff} < 1$), maka reaktor subkritis dan daya reaktor akan turun.

2.4. Perpindahan Panas Dalam Reaktor

Dalam suatu reaktor nuklir yang beroperasi selalu timbul panas pada elemen bahan bakar yang untuk selanjutnya panas tersebut dihantarkan ke kelongsong bahan bakar, sistem pendingin dan komponen lainnya. Dari keadaan

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

tersebut sumber panas mula-mula dihasilkan dari bahan bakar. Untuk dapat mengetahui distribusi panas yang dihasilkan diperlukan analisis dari sistem bahan bakar beserta lingkungan yang melingkupinya. Dalam menganalisis kelakuan distribusi panas dari suatu bahan bakar diperlukan data-data dari bahan penyusun dari bahan bakar tersebut serta gejala proses perpindahan panas yang ditimbulkan. Proses perpindahan panas dari suatu materi secara garis besar dikatagorikan menjadi tiga keadaan yaitu proses konduksi, konveksi, dan radiasi. Ketiga proses perpindahan panas tersebut masing-masing dapat dijelaskan sebagai berikut :

2.4.1. Konduksi Panas

Konduksi merupakan peristiwa perpindahan panas yang terjadi pada medium stasioner, medium tersebut bisa berupa solid atau fluida (Widya, 1992). Mekanisme perpindahan panas secara konduksi terdiri dari dua macam cara. Cara pertama adalah perpindahan panas karena interaksi molekuler, dimana molekul dengan tingkat energi lebih tinggi memberikan kepada yang bertingkat lebih rendah. Perpindahan panas macam ini terjadi pada zat padat. Cara yang kedua terjadi karena elektron bebas yang terutama dominan pada bahan logam (Anonim, 1978). Suatu benda yang temperaturnya tidak serba sama akan terjadi aliran panas dari temperatur yang lebih tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Besarnya panas yang pindah akan sebanding dengan luas permukaan dan gradien temperaturnya. Fourier merumuskan secara kuantitatif perpindahan panas dalam bentuk :

$$Q = -K A \frac{\Delta T}{\Delta X} \qquad (2.15)$$

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

K adalah konstanta pembanding, yang disebut konduktivitas panas. Konduktivitas panas ini merupakan sifat bahan yang akan memiliki harga berbeda untuk bahan berbeda pula. Secara differensial persamaan itu dapat dituliskan sebagai :

$$Q = - K A \frac{dT}{dX} \qquad (2.16)$$

2.4.2. Konveksi Panas

Konveksi merupakan proses perpindahan panas yaang terjadi antara permukaan padatan dan fluida yang bergerak (Widya, 1992). Dua macam proses dapat terjadi dalam perpindahan panas dengan konveksi ialah konveksi alam dan konveksi paksa. Konveksi paksa terjadi bila aliran fluida digerakkan oleh pompa. Sedangkan konveksi alam terjadi karena perubahan rapat masa oleh temperatur sehingga terjadi gaya yang berlawanan dengan arah percepatan gravitasi pada fluida yang turun rapat masanya (Anonim, 1978).

Persamaan yang menggambarkan perpindahan panas secara konveksi diajukan oleh Newton, sehingga disebut hukum pendinginan Newton yaang berbentuk:

$$Q = h A (T_s - T_f) \qquad (2.17)$$

Dengan h adalah koefisien perpindahan panas (W / m^2 K).

2.4.3. Radiasi Panas

Radiasi merupakan energi yang dipancarkan oleh materi pada suhu tertentu. Perpindahan panas jenis ini tidak mengharuskan adanya media untuk penjalarannya. Sehingga masih bisa terjadi meskipun pada kondisi hampa udara

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

(Widya, 1992). Perpindahan panas dengan radiasi dikenal dengan nama Hukum Stefan Boltzman, yaitu :

$$\frac{Q}{A} = \sigma T^4 \qquad (2.18)$$

Dalam Reaktor, perpindahan panas dari bahan bakar sampai ke permukaan kelongsong dapat terjadi secara konduksi, sedang perpindahan panas dari permukaan kelongsong ke air pendingin primer teras reaktor terjadi secara konveksi.

2.5. Laju Pembangkitan Panas Dalam Bahan Bakar

Persoalan yang penting dari pembangkitan panas dan perpindahan panas dalam reaktor nuklir banyak ditekankan pada laju pembebasan panas dan pembangkitan daya dalam teras reaktor yang dibatasi dengan panas nuklir. Didalam teras reaktor dapat dicapai tingkat fluks neutron berapa saja, tetapi panas yang dihasilkan harus dihilangkan. Reaktor harus dioperasikan pada level daya tertentu, dengan sistem panas yang dihasilkan harus dihilangkan, temperatur setiap titik dalam teras reaktor tidak boleh melebihi temperatur pengaman. Oleh sebab itu, proses pembangkitan panas dari elemen bahan bakar dan teras reaktor harus ditekan. Sedangkan laju pembangkitan panas nuklir sama dengan laju reaksi fisi dikalikan energi per reaksi. Bentuk umum laju reaksi fisi antara neutron dengan inti bahan bakar diberikan dengan persamaan (EL-Wakil, 1971):

$$R = \Sigma\Phi \qquad (2.19)$$

Dengan Σ adalah luas tampang makroskopis (cm^{-1}),

Φ adalah fluks neutron, (neutron/detik cm^2),

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

R mempunyai satuan (reaksi fisi/ detik cm^3).

Pembangkitan energi per reaksi fisi persatuan waktu, persatuan volume dinamakan daya panas volumetrik, yang diberikan dengan persamaan :

$$q''' = G\,R = G\,\Sigma\Phi \qquad (2.20)$$

Dengan G adalah energi per reaksi, dalam satuan MeV. Dari persamaan tersebut dapat diperoleh persamaan energi pembelahan neutron :

$$q''' = G_f\,\Sigma_f\,\Phi \qquad (2.21)$$

Notasi $_f$ menunjukan fisi atau pembelahan dan Σ_f adalah luas tampang pembelahan makroskopis. Untuk $\Sigma = \sigma\ N$ maka diperoleh persamaan :

$$q''' = G_f\,N_f\,\sigma_f\,\Phi \qquad (2.22)$$

Dimana N_f merupakan rapat inti dari bahan bakar dapat belah (U^{235}, U^{233}, Pu^{239}), dalam satuan inti/ cm^3. σ_f adalah luas tampang pembelahan mikroskopis, dalam satuan cm^2. Daya panas volumetrik mempunyai satuan MeV/cm^3 detik. Persamaan (2.22) dapat digunakan untuk mengevaluasi daya panas volumetrik pada posisi ring yang berbeda-beda dalam teras reaktor, dan pembentukan panas serta panas yang dihilangkan. Panas yang dihasilkan dalam bahan bakar tiap reaksi fisi tergantung dari lintasan pertikel, tergantung dari material yang digunakan dalam reaktor, juga tergantung pada konfigurasi internalnya. Kemudian diasumsikan 90% dari energi total yang dihasilkan dalam reaktor tiap reaksi pembelahan terjadi didalam bahan bakar sendiri, kira-kira 4% terjadi dalam moderator, 5% dibawa oleh neutrino, dan 1% lagi dihasilkan didalam material lainnya. Selanjutnya besarnya energi panas yang dihasilkan didalam bahan bakar

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

dapat diperkirakan sekitar 0,9 x 200 MeV atau sekitar 180 MeV tiap reaksi pembelahan.

Untuk bahan bakar yang baru dalam teras, jumlah energi yang dihasilkan tiap reaksi pembelahan lebih kecil dari perhitungan diatas sebab energi panas yang dihasilkan akibat pancaran hasil pembelahan tidak ada. Setelah selang beberapa waktu harga perhitungan diatas baru dapat dicapai.

Setelah reaktor *shutdown* energi hasil pembelahan menjadi berhenti, tetapi pancaran energi sebagian masih berlangsung yang dihasilkan oleh peluruhan fragmen pembelahan yang mengeluarkan sinar gamma dan sinar beta. Peluruhan energi ini, kira-kira 5 % atau 8% dari energi sebelum reaktor di *shutdown*. Oleh karena itu setelah reaktor *shutdown* masih diperlukan sistem perpindahan panas.

Untuk menentukan rapat bahan bakar dapat belah didalam persamaan (2.22), N_f, tergantung bahan bakar yang digunakan, pengkayaan bahan bakar, dan kerapatan dari material yang digunakan. N_f besarnya tetap tidak tergantung dari posisi bahan bakar di dalam teras reaktor. Jika kerapatan dan pengkayaan bahan bakar diketahui, maka harga N_f dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$N_f = \frac{A_v}{M_f} \rho_f i \qquad (2.23)$$

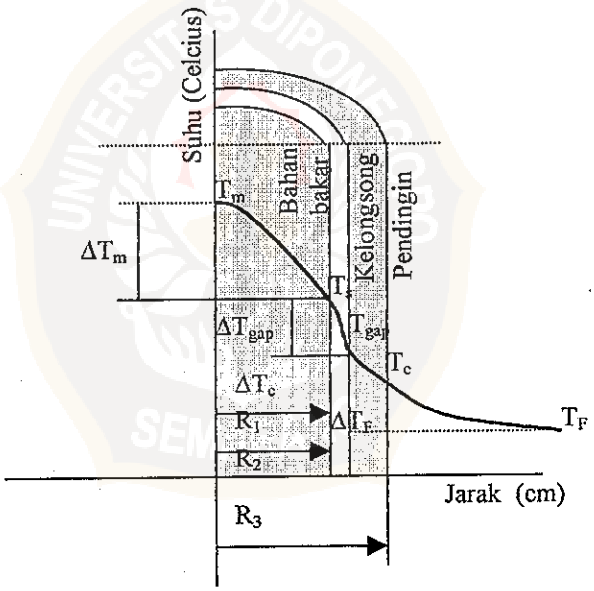
Dengan A_v adalah Bilangan Avogadro, $0{,}60255 \times 10^{24}$ molekul per mol, M_f adalah berat molekul bahan bakar dapat belah, ρ_f adalah kerapatan bahan bakar dapat belah gr/cm^3, i adalah jumlah atom per molekul bahan bakar.

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

2.6. Hantaran Panas Radial Dalam Elemen Bahan Bakar Silinder

Untuk menyederhanakan permasalahan panas pada elemen bahan bakar silinder, maka dianggap bahwa fluks neutron hanya berubah kearah aksial. Sedangkan hantaran panasnya dianggap hanya ke arah radial dan merata ke segala arah. Hantaran panas dari bahan bakar (silindris) sampai ke permukaan kelongsong dapat terjadi secara konduksi, sedang perpindahan panas dari permukaan kelongsong ke air pendingin primer teras reaktor terjadi secara konveksi (Prayoto,1978).

Distribusi suhu dari pusat bahan bakar ke pendingin dapat dilihat pada gambar 2.1.

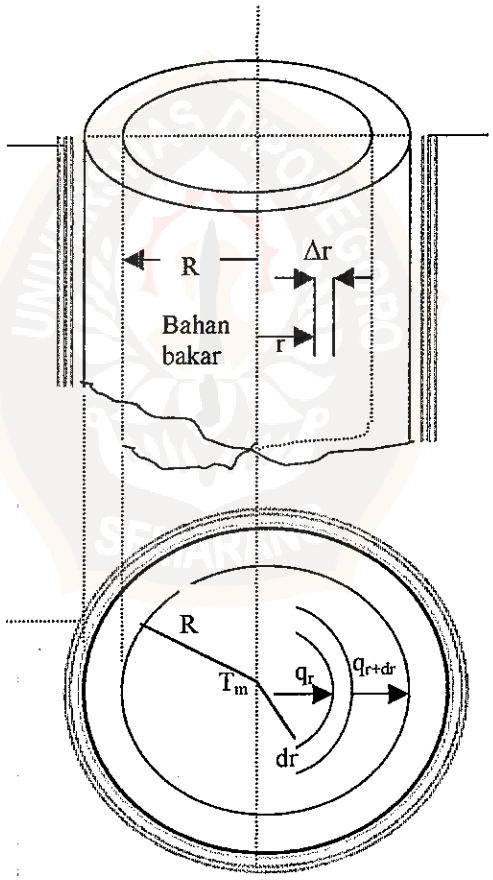


Gambar 2.1. Distribusi suhu bahan bakar

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

2.6.1. Hantaran panas dalam elemen bahan bakar

Ditinjau elemen bahan bakar silinder seperti pada gambar 2.2, pada gambar dibawahnya terlihat pandangan atas dari elemen bahan bakar yang dimaksud. Diameter bahan bakar sangat kecil jika dibandingkan dengan diameter teras reaktor, perubahan fluks neutron tidak begitu besar baik ke arah axial maupun ke arah radial. Hantaran panas juga akan dianggap hanya ke arah radial dan merata ke segala arah.



Gambar 2.2. Potongan dan penampang elemen bahan bakar

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Pada gambar 2.2 untuk kondisi hantaran tetap (*steady-state*), untuk unsur silinder dengan ketebalan dr sepanjang L pada jarak r dari pusat elemen bahan bakar, berlaku neraca panas sebagai berikut (El-Wakil, 1971) :

$$q''' \, 2\pi r L \, dr = q_{r+dr} - q_r \tag{2.24}$$

Dari rumus konduksi panas fourier didapat :

$$q_r = -K_f \, A \frac{dT}{dr} \tag{2.25}$$

$$= -K_f \, 2\pi r L \frac{dT}{dr} \tag{2.26}$$

$$q_{r+dr} = q_r + d\,q_r$$

$$= q_r + \frac{dq_r}{d_r} dr$$

$$= -K_f \, 2\pi r L \frac{dT}{dr} + \{ -K_f \, 2\pi L \, (r \frac{d^2T}{dr^2} + \frac{dT}{dr}) \, dr \} \tag{2.27}$$

Substitusi persamaan (2.27) ke persamaan (2.26) dan ke persamaan (2.24) didapat

$$q''' \, 2\pi r L \, dr = -K_f \, 2\pi L \, (r \frac{d^2T}{dr^2} + \frac{dT}{dr}) \, dr \tag{2.28}$$

Penyederhanaan persamaan (2.28) adalah

$$K_f \frac{d^2T}{dr^2} + \frac{k_f}{r} \frac{dT}{dr} + q''' = 0 \tag{2.29}$$

Persamaan differensial ini untuk menentukan distribusi suhu arah radial.

Yang bila diintegralkan akan didapatkan :

$$T = -q''' \frac{r^2}{4K_f} + c_1 \ln r_1 + c_2 \tag{2.30}$$

Konstanta c_1 dan c_2 dapat ditetapkan dengan syarat batas sebagai berikut :

Pada $r = 0$; $\frac{dT}{dr} = 0$; $T = T_m$

Dengan T_m adalah suhu pada pusat bahan bakar. Kemudian dengan syarat batas ini persamaan (2.30) menjadi

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

$$T = T_m - \frac{q''' r^2}{4K_f} \qquad (2.31)$$

Persamaan (2.31) merupakan persamaan suhu pada elemen bahan bakar sebagai fungsi jari-jari (r) dengan r adalah jarak dari pusat bahan bakar sampai dengan permukaan bahan bakar. Dan perbedaan suhu maksimum bahan bakar dalam sistem dapat ditentukan dengan mengambil r = R dan $T = T_s$ dari Persamaan (2.31), maka diperoleh :

$$T_m - T_s = \frac{q''' R^2}{4K_f} \qquad (2.32)$$

Dengan T_m adalah suhu pusat bahan bakar (^{0} C), T_s adalah suhu permukaan bahan bakar (^{0} C), K_f adalah konduktivitas panas bahan bakar (Watt / cm K).

Panas yang dihantarkan lewat r sama dengan seluruh panas yang dibangkitkan antara r = 0 dan r, jadi :

$$q_r = \pi r^2 L q''' \qquad (2.33)$$

Maka panas yang keluar lewat permukaan silinder bahan bakar q_s sama dengan jumlah panas yang dibangkitkan dalam elemen bahan bakar

$$q_s = \pi R^2 L q''' \qquad (2.34)$$

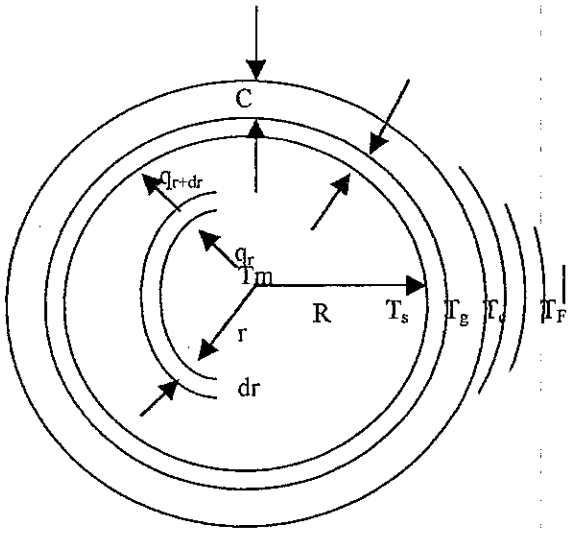
Substitusi persamaan (2.34) ke dalam persamaan (2.32) akan menghasilkan:

$$q_s = 4\pi K_f L (T_m - T_s) \qquad (2.35)$$

Kalau didefinisikan $A_s = 2\pi RL$ persamaan diatas dapat ditulis lagi menjadi :

$$q_s = 2K_f A_s \frac{T_m - T_s}{R} \qquad (2.36)$$

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)



Gambar 2.3. Penampang luas elemen bahan bakar silinder dengan kelongsong dan pendinginnya

2.6.2. Hantaran Panas Pada Celah (Gap)

Pada keadaan yang sesungguhnya permukaan bahan bakar biasanya tidak langsung berhubungan dengan bahan kelongsong. Suatu celah tertentu antara bahan bakar dan kelongsong biasanya sengaja disediakan untuk menampung pengembangan volume bahan bakar selama proses iradiasi dalam reaktor, seperti terlihat pada Gambar 2.3.

Hantaran panas pada celah (gap) dirumuskan dengan (Dudderstadt, 1976):

$$q_s = h_g A (T_s - T_{gap}) \quad (2.37)$$

$$\pi R_1^2 L q''' = h_g 2 \pi R_1 L (T_s - T_{gap}) \quad (2.38)$$

$$T_s - T_{gap} = \frac{q''' R}{2h_g} \quad (2.39)$$

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Substitusi persamaan (2.32) menghasilkan :

$$T_{gap} = T_m - \frac{q''' R_1^2}{4K_f} - \frac{q''' R_1}{2h_g} \qquad (2.40)$$

Dengan h_g adalah konduktivitas panas gap bahan bakar dan kelongsong (Watt / cm^2 K).

T_{gap} adalah suhu celah (gap) atau suhu permukaan dalam kelongsong (^{0} C).

2.6.3. Hantaran Panas Pada Kelongsong Bahan Bakar

Pada gambar 2.3 menunjukkan penampang luas elemen bahan bakar berbentuk silinder dengan jari-jari r yang dikelilingi oleh kelongsong bahan bakar dengan ketebalan ke arah radial C dan pendingin.

Perpindahan panas yang terjadi dalam kelongsong adalah (Dudderstadt, 1976):

$$q_2 = -K_c A \frac{dT}{dr} \qquad (2.41)$$

Untuk kondisi hantaran tetap (*steady-state*) dan dengan anggapan dalam bahan kelongsong tidak terjadi pembangkitan panas, daya hantar panas bahan kelongsong K_c dianggap tetap, dan hambatan oleh bidang kontak antara bahan bakar dan kelongsong diabaikan. Maka panas yang mengalir keluar dari permukaan bahan bakar sama dengan panas yang melalui kelongsong dan masuk ke dalam pendingin. atau dengan kata lain $q_1 = q_2$ jadi

$$q_1 = -K_c A \frac{dT}{dr} \qquad (2.42)$$

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Dengan mensubtitusikan persamaan (2.34) ke dalam persamaan (2.42), kemudian melakukan pengintegralan terhadap hasil substitusi tersebut akan didapatkan :

$$T_c = T_{gap} - \frac{q''' R_1^2}{2K_C} \ln \frac{R_3}{R_2} \tag{2.43}$$

Substitusi persamaan (2.40) ke persamaan (2.43) menghasilkan:

$$T_c = T_m - \frac{q''' R_1^2}{4K_f} - \frac{q''' R_1}{2h_g} - \frac{q''' R_1^2}{2K_C} \ln \frac{R_3}{R_2} \tag{2.44}$$

Dengan K_c adalah konduktivitas panas kelongsong (Watt / cm K), T_c adalah suhu permukaan luar kelongsong (^{0} C).

2.6.4. Hantaran Panas Konveksi

Banyaknya panas yang dipindahkan ke bahan pendingin dinyatakan oleh hukum pendingin Newton sebagai berikut (Dudderstadt, 1976) :

$$q = h_s A (T_c - T_f) \tag{2.45}$$

$$q = h_s 2 \pi R_3 L (T_c - T_f) \tag{2.46}$$

Substitusi persamaan (2.34) ke persamaan (2.46) didapatkan :

$$T_f = T_c - \frac{q''' R_1^2}{2R_3 h_s} \tag{2.47}$$

Substitusi persamaan (2.44) ke persamaan (2.47) diperoleh :

$$T_f = T_m - \frac{q''' R_1^2}{4K_f} - \frac{q''' R_1}{2h_g} - \frac{q''' R_1^2}{2K_C} \ln \left(\frac{R_3}{R_2}\right) - \frac{q''' R_1^2}{2R_3 h_s} \tag{2.48}$$

$$T_m - T_f = \frac{q''' R_1^2}{4K_f} + \frac{q''' R_1}{2h_g} + \frac{q''' R_1^2}{2K_C} \ln \left(\frac{R_3}{R_2}\right) + \frac{q''' R_1^2}{2R_3 h_s} \tag{2.49}$$

Dengan h_s adalah koefisien konveksi pendingin (Watt / cm^2 K), A adalah luas permukaan hantaran panas (cm^2), T_f adalah suhu pendingin (^{0} C), T_c adalah suhu permukaan kelongsong (^{0} C).

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)

Sehingga distribusi suhu karena rambatan panas dari pusat elemen bahan bakar sampai air pendingin primer teras reaktor dapat ditulis dalam bentuk :

$$T_m - T_f = \Delta T_m + \Delta T_{gap} + \Delta T_c + \Delta T_f \qquad (2.50)$$

Keterangan :

T_m adalah suhu dipusat bahan bakar

T_f adalah suhu pada air pendingin primer teras reaktor

ΔT_m adalah beda suhu dari pusat sampai permukaan elemen bahan bakar yang besarnya sama dengan $\frac{q''' R_1^2}{4K_f}$

ΔT_{gap} adalah beda suhu gap (sela) antara permukaan dengan kelongsong elemen bahan bakar yang besarnya sama dengan $\frac{q''' R_1}{2h_g}$

ΔT_c adalah beda suhu pada tebal kelongsong (cladding)elemen bahan bakar yang besarnya sama dengan $\frac{q''' R_1^2}{2K_C} \ln\left(\frac{R_3}{R_2}\right)$

ΔT_f adalah beda suhu permukaan kelongsong dengan air pendingin primer teras reaktor yang besarnya sama dengan $\frac{q''' R_1^2}{2R_3 h_s}$

This document is Undip Institutional Repository Collection. The author(s) or copyright owner(s) agree that UNDIP-IR may, without changing the content, translate the submission to any medium or format for the purpose of preservation. The author(s) or copyright owner(s) also agree that UNDIP-IR may keep more than one copy of this submission for purposes of security, back-up and preservation. (http://eprints.undip.ac.id)