

PROGRAM PERHITUNGAN PENGARUH REAKTIVITAS FEEDBACK TERHADAP DINAMIKA REAKTOR MENGUNAKAN METODA MONTE CARLO

Dra. Dwi Purwanti, MS

ABSTRAK

Daya reaktor sebanding dengan populasi neutron di dalam reaktor. Perubahan populasi neutron di dalam reaktor secara matematis dapat ditunjukkan melalui persamaan kesetimbangan neutron atau lebih dikenal dengan persamaan transport neutron. Dengan menentukan solusinya dapat memberikan gambaran tentang populasi neutron dalam reaktor pada suatu keadaan. Namun secara analitik solusi ini akan lebih sukar diperoleh, karena itu perlu dicari metoda lain untuk menyelesaikannya yaitu dengan menggunakan metode numerik.

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah mencari solusi persamaan transport neutron secara numerik memakai metoda Monte Carlo dengan memperhitungkan faktor reaktivitas *Feedback* dan merancang program perhitungan untuk menghitung populasi neutron sesuai perubahan parameter-parameter dalam reaktor yang diakibatkan oleh faktor reaktivitas *feed back* dengan metoda Monte Carlo.

Kata kunci : Reaktivitas Feedback, Populasi neutron, Metoda Monte C

A. Pendahuluan

1. Latar Belakang

Daya reaktor sebanding dengan populasi neutron di dalam reaktor. Tetapi populasi neutron ini selalu mengalami perubahan yang acak akibat berbagai proses yang terjadi yaitu penyerapan (*absorbtion*), penangkapan oleh inti (*capture*), hamburan (*Scattering*), pembiakan oleh fisi, kebocoran dan juga akibat proses umpan balik (*feedback*).

Perubahan populasi neutron di dalam reaktor secara matematis dapat ditunjukkan melalui persamaan kesetimbangan neutron atau lebih dikenal dengan persamaan transport neutron. Dengan menentukan solusinya dapat memberikan gambaran tentang populasi neutron dalam reaktor pada suatu keadaan. Namun secara analitik solusi ini akan lebih sukar diperoleh walaupun sudah dilakukan beberapa aproksimasi dan pendekatan, bahkan seringkali justru nilai praktis dari solusi yang diperoleh menjadi kabur. Karena itu akan di coba

digunakan pendekatan numerik dengan metoda Monte Carlo.

Dengan metoda ini suatu model matematis diselesaikan melalui suatu pendekatan dan kemudian dilakukan proses iterasi untuk memperoleh kecil galatnya sehingga diperoleh suatu solusi yang akan mendekati harga eksaknya.

Pada penelitian ini akan ditentukan solusi persamaan neutron transport dengan memperhatikan pengaruh reaktivitas *feedback* memakai pendekatan numerik dengan metoda Monte Carlo dan penggunaan komputer dengan kecepatan proses yang tinggi untuk membuat program perhitungannya. Diharapkan akan didapatkan cara penyelesaian yang lebih sederhana dengan hasil yang representatif dan program perhitungan yang dapat menggambarkan sifat-sifat dinamika reaktor yang real time.

2. Perumusan Masalah

Dari latar belakang masalah seperti yang diuraikan diatas maka dapat dirumuskan masalah sebagai berikut:

- a. Bagaimana mencari solusi persamaan transport neutron secara numerik memakai metoda Monte Carlo dengan memperhitungkan faktor reaktivitas *feedback*.

Bagaimana merancang program perhitungan untuk menghitung populasi neutron sesuai perubahan parameter-parameter dalam reaktor yang diakibatkan oleh faktor reaktivitas *feedback* dengan metoda Monte Carlo.

B. Tinjauan Pustaka dan landasan Teori

1. Klasifikasi dan Reaksi Neutron

Didalam suatu reaktor terjadi reaksi berantai yang akan menghasilkan neutron. Neutron yang diproduksi ini mempunyai distribusi energi yang luas, yaitu dari yang berenergi sangat rendah sampai sangat tinggi, sehingga berdasarkan energinya neutron dapat dibedakan menjadi lima golongan (Bernard T. Field, 1953), yaitu;

- (1) Neutron lambat $0 < E < 1 \text{ KeV}$
- (2) Neutron pertengahan $1 \text{ KeV} < E < 500 \text{ KeV}$
- (3) Neutron cepat $500 \text{ KeV} < E < 10 \text{ MeV}$
- (4) Neutron cepat sekali $10 \text{ MeV} < E < 50 \text{ MeV}$
- (5) Neutron ultra cepat $E < 50 \text{ MeV}$

Selanjutnya jika neutron menumbuk suatu bahan maka akan terjadi interaksi antara neutron dengan bahan tersebut. Interaksi itu dapat terjadi melalui dua cara (Marsongkohadi, 1978);

1) Interaksi nuklir

Pada interaksi ini karena neutron tidak bermuatan maka neutron akan langsung menembus atom dan berinteraksi dengan intinya. Interaksi nuklir ini dapat diklasifikasikan menjadi tiga tahap yaitu;

- a. Tahap partikel bebas.

Pada tahap ini saat neutron menumbuk bahan maka kemungkinan neutron tersebut ada yang dihamburkan oleh potesial-potesial inti

(hamburan potensial) dan sebagian ada yang masuk ke bahan melakukan tahap berikutnya yaitu;

- b. Tahap inti majemuk

Pada tahap ini neutron membentuk inti majemuk dan selanjutnya inti majemuk ini akan meluruh melalui peristiwa:

- (1) Hamburan elastik (hamburan resonan)
- (2) Hamburan tidak elastik.
- (3) Penangkapan neutron (n, α)
- (4) Reaksi (n, β) dan (n, n)
- (5) Pembelahan (fisi)

2) Interaksi elektromagnetik

Pada interaksi ini walaupun neutron tidak bermuatan tetapi neutron mempunyai momen magnetik sehingga neutron dapat berinteraksi secara elektromagnetik dengan inti atom.

Pada umumnya interaksi neutron cepat dengan inti atom dalam bahan membentuk tumbukan elastik (Atom P. Arya, 1966).

Secara kuantitatif masing-masing peristiwa interaksi neutron dengan bahan dikarakteristikkan melalui penampang lintang miskroskopik σ dan penampang lintang makroskopik Σ .

(1) Penampang lintang mikroskopik

Penampang lintang nuklir disebut juga penampang lintang mikroskopik totalnya diberi notasi σ_t adalah kebolehdadian setiuap inti atom dalam bahan untuk menghambur, menangkapatom menyerap neutron, atau merupakan jumlah dari masing-masing penampang lintang miskroskopik dari setiap interaksi (ANL7291 Rev 1, 1972), atau ditulis :

$$\sigma_t = \sigma_s + \sigma_a + \sigma_f + \dots \dots \dots (1)$$

Dimana

- σ_t = Penampang lintang hamburan
- σ_s = Penampang lintang serapan
- σ_f = Penampang lintang fisi

Pada umumnya pengukuran σ dalam satuan barn dimana

$$1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2$$

(2) Penampang Lintang Makroskopik

Besaran makroskopik untuk penampang lintang dinotasikan sebagai Σ . Yaitu kebolehdjian setiap cm^2 dari bahan akan menghamburkan atau memfisikan neutron. Hubungan antara penampang lintang mikroskopik total dengan penampang lintang makroskopik total adalah sebagai berikut (ANL7291 Rev 1, 1972),

$$\Sigma_t = N \cdot \sigma_t \dots \dots \dots (2)$$

Dimana N adalah jumlah inti atom persatuan volume bahan yang didapatkan dari (Beckurts, 1964)

$$N = \frac{\text{Density}}{\text{beratAtom}} \cdot \text{bilanganA vogadro}$$

Bilangan Avogadro = $N_0 = 6,025 \cdot 10^{26} \text{ kmol}^{-1}$

b. Produksi Neutron

Menurut Lamarsih (971) dalam Zul bahrum (1991) setiap peristiwa fisi akan dihasilkan lebih dari satu neutron dan dipancarkan secara serentak dalam waktu 10^{-17} detik dan disebut neutron serentak (*prompt neutron*) dengan kecepatan :

$$S_p(r, u, t) = V_p \cdot \Sigma_f(r) \cdot \Phi(r, u, t) \dots \dots \dots (3)$$

- V_p = Produksi neutron serentak rata-rata
- Σ_f = Penampang fisi makroskopik
- Φ = Fluks neutron

Disamping itu dihasilkan pula neutron lain yang berasal dari proses deeksitasi fragmen fisi yang disebut neutron kasip (*delayed neutron*) dengan total fraksiu neutron kasip tiap fisi adalah :

$$\beta = \sum_{i=1}^6 \beta_i \dots \dots \dots (4)$$

dimana
 β_i = bagian neutron kasip yang dihasilkan oleh prekursor jenis ke-i

Laju produksi rapat neutron oleh prekursor dinyatakan melalui

$$S_D(r, u, t) = \sum_{i=1}^6 \alpha_i \cdot C_i(r, t) \dots \dots \dots (5)$$

- α_i = Konstanta peluruhan prekursor
- C_i = Konsentrasi prekursor

Sehingga laju produksi rapat neutron (neutron serentak dan neutron kasip) adalah

$$S_p(r, u, t) = V_p \cdot \Sigma_f(r) \cdot \Phi(r, u, t) + \sum_{i=1}^6 \alpha_i \cdot C_i(r, t) \dots \dots \dots (6)$$

Bila V adalah rata-rata neutron yang dihasilkan tiap fisi (neutron serentak dan neutron kasip) maka :

$$V_p = (1 - \beta) \cdot v \dots \dots \dots (7)$$

Sehingga laju produksi rapat neutron menjadi :

$$S_p(r, u, t) = (1 - \beta) \cdot v \cdot \Sigma_f(r) \cdot \Phi(r, u, t) + \sum_{i=1}^6 \alpha_i \cdot C_i(r, t) \dots \dots \dots (8)$$

Persamaan Transport

Neutron yang dihasilkan fisi setelah mengalami moderasi kembali akan melanjutkan fisi sehingga terjadi reaksi berantai. Semua neutron dalam siklus fisi ke fisi berikutnya dalam satu generasi. Selama masa tersebut neutron tetap akan mengalami beberapa peristiwa fisis diantaranya hamburan, penangkapan dan penyerapan, keluar dari ruang reaktor (bocor) yang semuanya menurut Lamarsh(1972) dapat digambarkan secara matematis :

1. Jumlah Neutron yang dapat keluar

$$d^3u \cdot dt \int f d^3r \vec{u} \cdot \vec{v} \cdot n(r, u, t)$$

2. Laju tumbukan yang dialami neutron

$$d^3u \cdot dt \int d^3r \vec{u} \Sigma T(r, u, t) \cdot n(r, u, t)$$

Dimana $\Sigma T(r, u, t)$ = Penampang makroskopik total

3. Jumlah neutron yang dihambur

$$d^3u. dt \int d^3\bar{U} \int d^3\bar{U} \Sigma_s(\bar{U} u).n (r,u,t)$$

$\Sigma_s(\bar{U} u)$ = Penampang makroskopik hamburan

4. Jumlah produksi neutron dari sumber

$$d^3u. dt \int d^3r \dot{u}. S (r,u,t)$$

Populasi neutron total terhadap waktu dalam ruang kecepatan dan ruang spasial adalah sebagai berikut :

$$\int d^3r \{ \delta n (r,u,t)/ \delta t + \vec{u} \cdot \vec{v} n(r,u,t) + U \Sigma T(r,u,t).n (r,u,t) - \int d^3\bar{U} \Sigma_s(\bar{U} u).n (r,u,t) - s (r,u,t) \} = 0$$

Integrasi terhadap ruang dapat dipilih dan ini akan tetap nol pada sembarang r, sehingga

$$\delta n (r,u,t)/\delta t = - \vec{u} \cdot \vec{v} n(r,u,t) - d^3r \vec{u} \Sigma T(r,u,t).n (r,u,t) + \int d^3\bar{U} U \Sigma_s(\bar{U} u).n (r,u,t) + s (r,u,t) \}$$

Sumber neutron S (r,u,t) pada persamaan 12 adalah produk fisi seperti yang ditunjukkan oleh persamaan 6 sehingga bila disubstitusikan ke persamaan 12 diperoleh

$$\delta n (r,u,t)/ \delta t = - \vec{u} \cdot \vec{v} n(r,u,t) - d^3r \vec{u} \Sigma T(r,u,t).n (r,u,t) + \int d^3\bar{U} \Sigma_s(\bar{U} u).n (r,u,t) + (1- \beta) \cdot v \cdot \Sigma f (r) \cdot \Phi (r, u, t) + \sum_{i=1}^6 \alpha_i \cdot C_i$$

Persamaan di atas disebut persamaan kinetik neutron dalam bentuk persamaan transport atau persamaan transport neutron.

D. Feedback

Feedback dapat diakibatkan oleh beberapa faktor diantaranya adalah pengaruh

suhu, perubahan atomik, peracunan oleh Xenon, efek Doppler dan faktor-faktor lainnya. Dengan adanya perubahan pada parameter-parameter feedback maka akan mempengaruhi populasi neutron didalam reaktor sehingga daya reaktor pun akan berubah.

Pada penelitian ini akan dilibatkan beberapa faktor yang dianggap paling dominan yang diperhitungkan melalui perubahan reaktivitas yaitu reaktivitas temperatur, reaktivitas Xenon serta reaktivitas batang kendali atau :

$$\int \text{tot} = \int (T) + \int (Xe) + \int (rod)$$

dimana

$$\int \text{tot} = \text{reaktivitas total}$$

$$\int (T) = \text{reaktivitas temperatur}$$

$$\int (Xe) = \text{reaktivitas Xenon}$$

$$\int (rod) = \text{reaktivitas batang kendali}$$

E. Metoda Monte Carlo

Menurut Jerome Spanier (1969) metoda Monte Carlo adalah metoda eksperimen yang berdasarkan pada penggunaan bilangan acak (random). Dasar utama metoda ini adalah tersedianya sederetan bilangan acak yang dihasilkan dari fungsi random sebuah komputer yang memenuhi suatu fungsi distribusi tertentu. Ada beberapa fungsi distribusi dari bilangan acak diantaranya menurut Budi Gunadi Sadikin (1987) dapat diklasifikasikan menjadi:

1. Fungsi distribusi probabilitas, mewakili frekuensi relatif terjadinya peubah acak dari populasi tertentu.
2. Fungsi distribusi kumulatif, mewakili probabilitas dari peubah acak x yang lebih kecil dari suatu harga tertentu.
3. Fungsi distribusi konanik, mewakili probabilitas peubah acak x yang sama untuk daerah interval x atau $p(x) = 1$ untuk $0 \leq x \leq 1$

Fungsi distribusi kanonik dalam metoda Monte Carlo mempunyai peranan yang sangat penting karena bilangan acak yang diperoleh dari fungsi random sebuah komputer biasanya memenuhi fungsi distribusi kanonik. Dengan bilangan acak ini bisa dilakukan eksperimen matematik terhadap masalah yang ingin dipecahkan dengan menerapkan teori probabilitas. Metoda Monte Carlo ini dalam segala bentuknya melibatkan beberapa macam proses random sampling. Dalam komputasi Monte Carlo sample diambil dari "populasi induk" dengan hukum-hukum probabilitas khusus. Data statistik dikumpulkan dari sampel dan melalui analisis dari data ini sebagai peran utama untuk menyimpulkan "populasi induk". Hukum-hukum probabilitas tersebut dapat dibuat sendiri, tergantung pada tujuan-tujuan khususnya.

Salah satu teknik yang harus dikuasai dalam menerapkan metoda Monte Carlo adalah bagaimana cara mengambil sampel bilangan acak dari populasi bilangan acak yang memenuhi suatu fungsi distribusi tertentu. Ada tiga macam teknik pengambilan sampel bilangan acak dari suatu fungsi distribusi, yaitu:

1. *Top Hat Method*
2. Metoda Inverse fungsi kumulatif
3. Teknik Rejeksi

(Budi Gunadi, 1987)

Hasil yang diperoleh dari penggunaan metoda Monte Carlo tidak bisa lepas dari faktor galat. Untuk mendapat hasil yang teliti, galat yang timbul pada suatu metoda harus diperkecil. Secara garis besar ada dua cara untuk memperkecil galat pada metoda Monte Carlo, yaitu;

1. Hukum jumlah besar (*The Law of Large Number*), hukum ini menyatakan bahwa hasil suatu pengukuran akan semakin baik bila pengukuran yang dilakukan semakin banyak
2. Teorema sentral Limit (*Central Limit Theorem*), teorema ini menyatakan bahwa hasil suatu

pengukuran akan semakin baik bila varian diperkecil.

Untuk menyelesaikan masalah persamaan netron transport ini dengan metoda Monte Carlo maka proses perjalanan netron dipandang secara mikroskopik. Dalam hal ini sejarah netron dilacak secara rinci mulai dari energi awalnya, proses interaksinya sampai akhirnya diserap atau lolos dari reaktor. Dan dalam tiap-tiap proses tersebut diambil sejumlah bilangan acak yang diterapkan untuk masing-masing batasan kemudian dilakukan proses iterasi.

C. TUJUAN, MANFAAT DAN METODA PENELITIAN

1. Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah

- (1) Mencari solusi persamaan transport netron secara numerik memakai metoda Monte Carlo dengan memperhitungkan faktor reaktivitas *feedback*.
- (2) Merancang program perhitungan untuk menghitung populasi netron sesuai perubahan parameter-parameter dalam reaktor yang diakibatkan oleh faktor reaktivitas *feedback* dengan metoda Monte Carlo.

2. Manfaat Penelitian

Setelah penelitian ini dilakukan dapat dihasilkan suatu program perhitungan yang dapat menggambarkan populasi netron didalam reaktor pada suatu keadaan dan selanjutnya program perhitungan ini dapat dijadikan acuan guna mempelajari dinamika suatu reaktor.

3. Metoda Penelitian

Penelitian yang akan dilakukan merupakan penelitian *Research and Development* dengan tujuan verifikasi yaitu menguji kebenaran sesuatu yang ada dalam hal ini model persamaan matematis dengan cara/metoda yang berbeda.

Pendekatan yang dilakukan dalam penelitian ini adalah pendekatan numerikal (melibatkan model matematik dengan solusi secara numeris teknik komputasi). Adapun analisis numerik yang digunakan adalah Metoda Monte Carlo.

Sedangkan sebagai instrumen penelitiannya adalah suatu program komputer dengan menggunakan bahasa pemrograman Turbo Pascal versi 7.0.

Teknik yang digunakan untuk mengambil sampel bilangan acak dalam penelitian ini adalah dengan cara *Top Hat Method*.

D. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Data Hasil penelitian

Setelah program selesai dibuat maka dilakukan percobaan untuk menguji hasil perhitungan. Masing-masing percobaan dilakukan tiga kali dan diambil harga rata-ratanya. Data percobaan secara keseluruhan dipaparkan pada lampiran 3. Dari data percobaan tersebut dapat dilihat hasil percobaan yaitu bahwa reaktivitas *feedback* akan mempengaruhi harga fluk netron akhir. Harga reaktivitas *feedback* yang diperhitungkan hanya reaktivitas yang harga positif dan harga reaktivitas *feedback* ini dipengaruhi oleh fluk netron masukan, perubahan temperatur yang juga dipengaruhi oleh netron masukan serta posisi batang kendali.

Pengaruh harga reaktivitas *feedback* ini hanya akan dapat diamati pada harga $t \approx 10^{-4}$ detik karena ini sesuai dengan umur generasi rata-rata netron yaitu 10^{-4} detik. Pengaturan posisi batang kendali yang berfungsi sebagai kendali reaktor hanya diamati sampai posisi batang $< \frac{1}{4}$ panjang batang kendali.

Lampiran 4 adalah data yang dicari untuk mendapatkan hubungan antara perubahan waktu dan fluk akhir dan fluk akhir yang dipengaruhi oleh faktor *feedback*. Selanjutnya data tentang perubahan netron masukan dan konsentrasi Xenon serta reaktivitas Xenon

ditunjukkan pada lampiran 4 serta lampiran 5 menunjukkan data tentang perubahan posisi batang kendali dengan reaktivitas batang kendali⁸. Kemudian berdasarkan data-data tersebut masing-masing dibuat grafik seperti yang dipaparkan pada lampiran 7

2. Pembahasan

Secara keseluruhan terlihat bahwa pada harga $t \approx 10^{-5}$ detik tidak terlihat adanya pengaruh *feedback* pada harga fluk akhir netron. Perubahan harga *feedback* hanya berpengaruh pada pada harga $t \approx 10^{-4}$ detik, hal ini disebabkan umur generasi rata-rata netron berkisar pada 10^{-4} detik. Pada harga yang lebih besar dari 10^{-4} detik pengaruh harga dari reaktivitas *feedback* menjadi tidak linier lagi.

Pengaruh reaktivitas batang kendali hanya dapat diamati pada posisi batang kendali < 25 atau $< 1/4$ panjang batang kendali (pada penelitian panjang batang kendali adalah = 100). Hal ini karena ada posisi batang kendali $> 1/4$ panjang batang kendali, pengaruh reaktivitas batang kendali akan menimbulkan perubahan netron yang lebih cepat dan bernilai sangat tinggi sehingga terjadi *over floating*. Karena itu pengamatan untuk posisi batang kendali yang $> \frac{1}{4}$ panjang batang kendali harus dilakukan untuk $10^{-5} < t < 10^{-4}$.

Selanjutnya jika reaktivitas berharga negatif maka tidak akan terjadi perubahan harga pada fluk akhir netron. Hal ini disebabkan pada penelitian ini dipilih simulasi reaktor untuk reaktivitas positif. Dari data pada lampiran 3 terlihat bahwa yang berubah hanya fluk akhir yang tanpa *feedback*, karena reaktivitas tanpa *feedback* dalam hal ini positif ($\rho = 1 - 1/ke = 0,1395$). Harga reaktivitas ini hanya dipengaruhi oleh parameter-parameter konstan dari reaktor yaitu koefisien multiplikasi efektif yang bergantung pada penyelesaian rumus empat faktor

dan peluang lolos resonansi, sehingga harga ρ adalah konstan.

Harga konsentrasi Xenon terlihat sangat tinggi dan bergantung pada perubahan harga neutron termal yang dipengaruhi oleh harga neutron masukan. Akan tetapi karena penampang serapan Xenon yang juga relatif sangat kecil maka reaktivitas Xenon ini pada harga masukan neutron yang relatif kecil tidak berpengaruh.

Berdasarkan data lampiran 4 yang digambarkan pada grafik lampiran 7 terlihat bahwa dengan memperhitungkan faktor reaktivitas feedback maka akan terjadi perbedaan harga fluk neutron akhir yang cukup mencolok bila dibandingkan dengan harga fluk neutron akhir yang tidak memperhitungkan faktor reaktivitas *feedback*.

Selanjutnya lampiran 5 dan 6 menunjukkan bahwa konsentrasi Xenon dipengaruhi oleh neutron termal yang bergantung pada neutron masukan, sedangkan reaktivitas temperatur dipengaruhi oleh perubahan temperatur. Perubahan temperatur ini sendiri bergantung pada perubahan harga neutron masukan. Sementara itu reaktivitas batang kendali hanya dipengaruhi oleh posisi batang kendali dan tidak dipengaruhi oleh neutron masukan.

Harga-harga neutron termal maupun konsentrasi Xenon pada lampiran 3 terlihat tidak sama untuk harga neutron masukan yang sama. Hal ini disebabkan perhitungan dengan metoda Monte Carlo menggunakan sistem bilangan random, sehingga tidak diperoleh harga eksak tetapi terlihat bahwa harga-harga tersebut masih berkisar pada orde yang sama. Untuk mendapatkan harga yang mendekati harga eksaknya maka perlu diterapkan Hukum Jumlah Besar dengan menentukan jumlah bilangan random yang sangat besar sehingga galat dari perhitungan dapat diperkecil. Pada penelitian ini

dipilih bilangan random masing-masing sejumlah 1000 buah

Daftar Pustaka

- Arya P. Atam (1996). **Fundamental of Nuclear Physics**. Boston, USA: Allyn& Bacon Inc
- Beckurts, K.H.& Wirtz, K.(1964). **Neutron Physics**. New York : Willey & Sons Inc
- Bernard T. Feld. (1953). **Experimental Nuclear Physics Vol II**. York : Willey & Sons Inc.
- Hanscomb, D.C. & Hammersley, J.M. (1965). **Monte Carlo Method**. London: Meethuen & Co. LTD.