

ANALISIS KORELASI RESONANCE INTEGRAL DAN TEMPERATUR KELUARAN PAKET PROGRAM V.S.O.P PADA REAKTOR HTGR *PEBBLE BED*

Khairina Natsir¹⁾, Elfrida Saragi²⁾, Nursinta Adi Wahanani³⁾

^{1,2,3)} Bidang Komputasi, Pusat Pengembangan Informatika Nuklir.

Batan Tenaga Nuklir Nasional – Serpong 15310

Kawasan Puspiptek – Gedung 71, Telp (021-7560905)

Email : yenny@batan.go.id

Abstrak

Salah satu konsep reaktor yang mendapat perhatian khusus dalam beberapa tahun terakhir ini adalah reaktor gas temperatur tinggi (HTGR) berbahan bakar pebble (HTGR pebble bed). Dalam desain HTGR pebble bed, resonance integral dan temperatur merupakan dua parameter yang cukup krusial yang diperhatikan berkaitan analisis keselamatan. Kritikalitas reaktor sangat dipengaruhi oleh moderasi neutron yang performanya bergantung pada resonance dan temperatur. Makalah ini menginvestigasi resonance integral HTGR pebble bed sebagai fungsi temperatur pada bahan bakar kernel yang diperoleh dari keluaran paket program Very Superior Old Program (V.S.O.P'94). Nilai resonance integral diidentifikasi pada berbagai level temperatur dan dihitung korelasinya. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa resonance integral mempunyai korelasi yang kuat dengan temperatur.

Kata kunci: Resonance Integral, Temperatur, Reaktor HTGR, Pebble Bed

1. PENDAHULUAN

Temperatur dan Resonance Integral merupakan dua parameter yang sering dibahas dalam penelitian mengenai reaktor nuklir. Hal ini tentu dapat dipahami karena kedua parameter tersebut merupakan sisi penting dalam proses operasi reaktor nuklir. Pelebaran dari puncak resonansi (*doppler broadening*) akan menyebabkan pula pada perubahan reaktivitas dan temperature bahan bakar. Disisi lain perubahan temperatur pada bahan bakar juga menyebabkan perubahan pada resonance absorption.

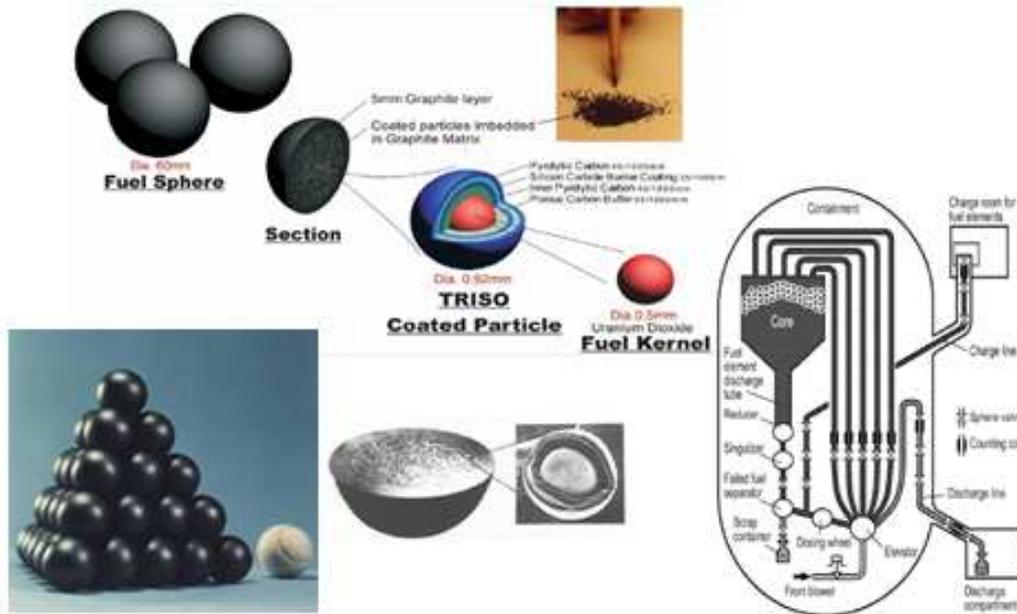
Atas dasar ini penulis mencoba menghitung korelasi antara integral resonance dan temperature yang diperoleh dari hasil keluaran program VSOP.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Reaktor HTGR (High Temperature Gas-cooled Reactor)

HTGR merupakan jenis reaktor termal berpendingin gas helium yang dapat memproduksi panas hingga 1000⁰ C. Dengan temperatur yang sangat tinggi tersebut reaktor jenis ini mampu meningkatkan efisiensi konversi energi pada sistem produksi hidrogen menggunakan proses pemisahan air dengan termokimia. Reaktor HTGR menggunakan bahan bakar berbentuk bola dengan diameter sekitar 1 mm, dimana bagian intinya adalah uranium (UO₂, UC, UCO) kemudian dilapisi buffer, silikon karbon, dan pyrocarbon atau yang biasa disebut dengan bahan bakar berlapis TRISO (tristructural isotropic). Skema HTGR dengan bahan bakar pebbled bed dapat dilihat pada gambar.1 dibawah ini.

Bola-bola kecil tersebut dilapisi dengan grafit yang kemudian akan digabungkan kedalam suatu wadah bola besar berdiameter 4-6 cm. Dalam 1 bola besar terdapat sekitar 10.000-30.000 partikel bahan bakar berlapis TRISO yang dipadatkan bersama dengan bahan bakar matriks grafit dan kemudian diberi selongsong grafit setebal 5 mm.



Gambar 1. HTGR berbahan bakar bola / pebble-bed

Bahan bakar partikel berlapis dianggap sebagai pilihan pertama dengan pertimbangan performa tinggi pada burn-up bahan bakar dan temperatur tinggi. Partikel berlapis TRISO disusun oleh kernel Uranium dengan pengkayaan 8,2%. Partikel ini dilapis dengan 4 lapisan yang bertujuan sebagai bejana bertekanan yang mampu menampung hasil pembelahan agar tetap berada didalam bahan bakar. Konsep pembuatan bahan bakar ini adalah untuk mendapatkan ukuran bahan bakar sekecil mungkin dan tidak saja hanya mengukung produksi fisi tetapi juga berfungsi sebagai moderator dengan adanya grafit sehingga perbedaan suhu pada bahan bakar tidak mudah mengalami keretakan.

Bentuk TRISO seperti pada Gambar 1. memiliki susunan sebagai berikut :

- Lapisan Karbon Pirolitik densitas rendah (PyC)
 Lapisan ini adalah lapisan pertama setelah inti yang mempunyai densitas rendah dan berpori yang bertujuan sbagai penampung gas hasil fisi dan mengatasi *swelling* akibat adanya produk fisi padat.
- Lapisan Karbon Pirolitik densitas tinggi (IPyC)
 Lapisan ini berfungsi sebagai pengukung tekanan gas fisi.
- Lapisan Silikon Karbida (SiC)
 Lapisan ini bertujuan untuk mengukung produk fisi yang sangat aktif gerakannya. Selain itu SiC juga digunakan karena mempunyai ketahanan suhu yang sangat tinggi yaitu 2100⁰ C, sehingga berfungsi sebagai penghalang mekanik dan kimia pada suhu tinggi.
- Lapisan Karbon Pirolitik densitas tinggi (OPyC)
 Lapisan ini bertujuan penahan mekanik bahan bakar.

Spesifikasi reaktor dan bahan bakar yang dapat digunakan untuk perhitungan RGTT200K adalah sebagai tabel.1 dibawah ini.

Tabel.1 Spesifikasi Reaktor dan Spesifikasi teknis bahan bakar partikel berlapis RGTT200K

Parameter Reaktor		
1.	Daya reaktor, MWth	200
2.	Temperatur He (gas Helium) masuk (bagian atas teras), C	628.1
3.	Temperatur He (gas Helium) keluar (bagian bawah teras, C	950
4.	Tekanan sistem, MPa	5
5.	Laju aliran massa gas He (top to down), kg/sec	120
6.	Diameter teras silinder, m	3
7.	Tinggi teras silinder aktif, m	9.43
Tipe Kernel UO2		
1	Enrichment, % (U-235)	10

2	Radius kernel, cm	0.025	
3	Densitas kernel, gr/cc	10.40	
Lapisan Triso			
	Diameter dari dalam kernel ke luar (cm)	Tebal (cm)	Densitas (gr/cc)
Lapisan penyangga karbon berpori (<i>buffer</i>)	0.0345	0.0095	1.05
Lapisan dalam piro karbon (IPyC)	0.0385	0.0040	1.90
Lapisan Silikon Karbida (SiC)	0.0420	0.0035	3.18
Lapisan luar piro karbon (OPyC)	0.0460	0.0040	1.90
Pebble-Bed			
1	Diameter bola <i>pebble</i> , cm	6.00	
2	Diameter zona aktif bahan bakar, cm	5.00	
3	Tebal matriks grafit <i>outer shell</i> , cm	0.50	
4	Densitas matrik grafit <i>outer shell</i> , gr/cc	1.75	

Resonance Integral

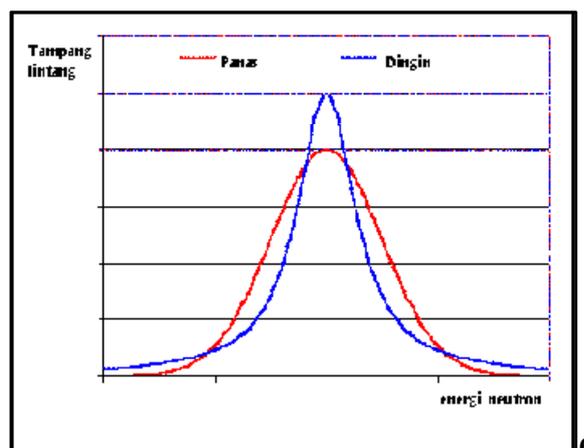
Resonance adalah tingkat penyerapan total per inti oleh absorber resonansi, diformulasikan sebagai berikut :

$$I_{\gamma} = \int \sigma_{\gamma}(E)\phi(E) dE$$

Sedangkan total resonance integral merupakan penjumlahan dari semua resonance, yaitu penjumlahan dari semua individual resonance integral, dimana total resonance escape probabilitynya adalah sebagai berikut:

$$p = \prod_i p_i = \exp\left(-\frac{1}{\xi\sigma_s} \sum_i I_i\right)$$

Resonance escape probability p adalah probabilitas neutron cepat yang lolos dari serapan ^{238}U pada daerah energi resonansi saat proses moderasi menjadi neutron thermal. Neutron resonansi merupakan bentuk kurva energi yang tajam berupa puncak dan lembah yang terlihat jelas pada kurva tampang lintang serapan mikroskopik dari U-238 pada Gambar 1. Akibat meningkatnya temperatur teras reaktor selama reaksi fisi berlangsung akan menyebabkan terjadinya pelebaran puncak energi neutron resonansi yang sering disebut dengan Efek Doppler.



Gambar 2. Efek Doppler

Seperti diketahui bahwa neutron resonansi yang berada pada rentang energi 7 eV-200 eV memiliki tampang lintang reaksi yang cukup tinggi terhadap U-238 (karena memiliki nilai energi yang sesuai dengan nilai energi eksitasi inti U-238) sehingga pelebaran dari puncak neutron resonansi akan meningkatkan serapan neutron oleh U-238 dan mengakibatkan berkurangnya jumlah neutron termal yang diserap oleh U-235 sehingga k_{eff} menjadi berkurang.

Pengaruh Temperatur terhadap Resonansi

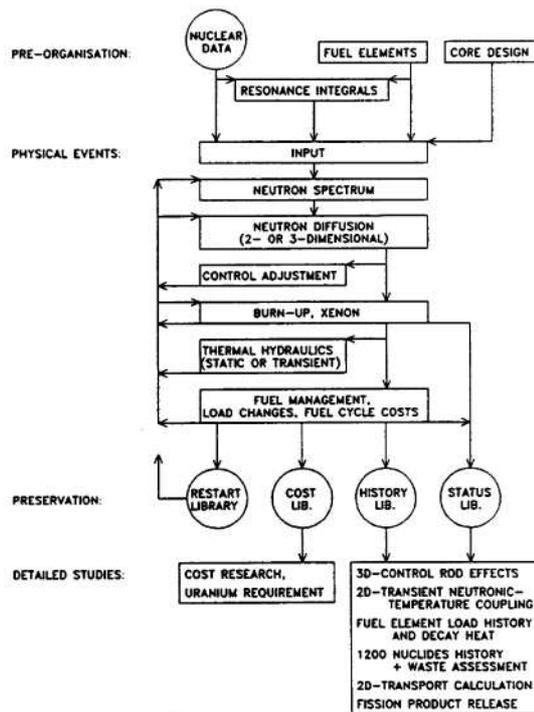
Peningkatan temperatur terhadap melebarnya puncak neutron resonansi terjadi karena gerakan termal dari inti target yang meningkatkan probabilitas penyerapan neutron. Inti target beresilasi terhadap posisi normalnya

akibat peningkatan temperatur. Akibatnya tidak hanya neutron dengan energi tertentu saja yang terserap melainkan juga neutron lain yang memiliki energi yang berada pada interval energi neutron yang sebelumnya akan memiliki probabilitas absorpsi yang besar. Hal ini disebabkan karena apabila inti target bergerak terhadap neutron datang maka neutron dengan energi yang lebih kecil dari energi yang seharusnya akan diserap, sementara itu hal sebaliknya akan terjadi apabila inti target bergerak pada arah yang sama dengan neutron datang, sehingga puncak-puncak resonansi akan lebih lebar pada temperatur yang tinggi dimana energi neutron puncak resonansi untuk atom U-238 adalah 6,67 eV. Dengan meningkatnya temperatur teras reaktor maka energi termal dari inti target bertambah dan oleh karenanya neutron dengan energi yang lebih rendah dan lebih tinggi dari nilai energi eksitasi inti target akan dengan mudah diserap.

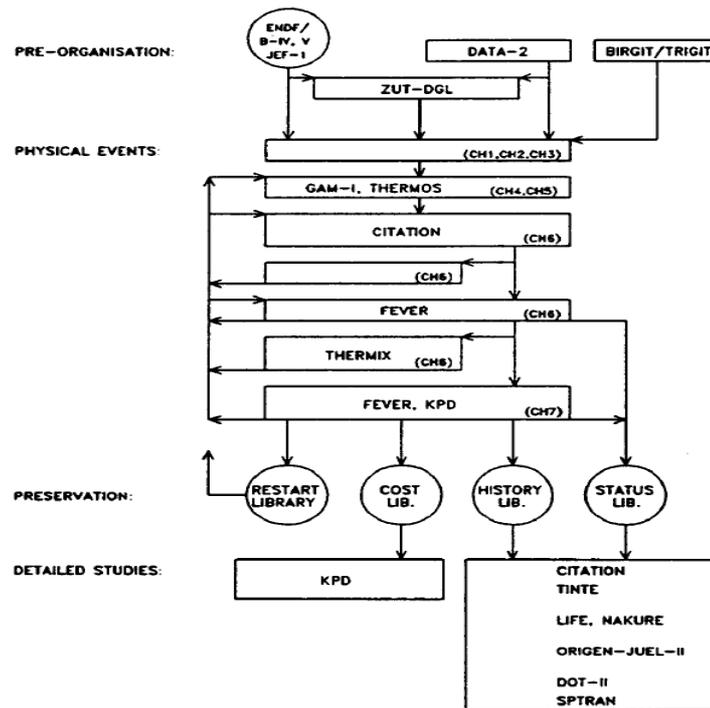
V.S.O.P (Very Superior Old Program)

VSOP'94 (Very Superior Old Program) atau biasa disingkat dengan VSOP, adalah suatu kode sistem yang saling terintegrasi untuk mensimulasikan riwayat hidup reaktor nuklir yang dikhususkan untuk pembelajaran dan penelitian. VSOP mampu menghitung penaksiran spektrum neutron, daur bahan bakar, difusi 2-D, integral resonansi, perkiraan biaya bahan bakar reaktor, dan termal hidrolik. VSOP juga dapat digunakan untuk studi perbandingan reaktor dan simulasi keselamatan. VSOP adalah sistem kode komputer yang terhubung bersama untuk melakukan simulasi numerikal reaktor nuklir fisika. Program ini juga dapat digunakan untuk semua jenis reaktor termal, termasuk reaktor berukuran kecil yang dikembangkan untuk modular pembangkit listrik atau pemanfaat energi panas. Proses perhitungan yang dapat dilakukan VSOP yaitu, perencanaan disain reaktor bahan bakar, penaksiran spectrum neutron, perhitungan difusi 2 atau 3 dimensi, daur bahan bakar, perkiraan biaya bahan bakar, dan termal hidrolik. Kode VSOP mampu mengikuti riwayat hidup reaktor dari pertama kali aktif sampai berlangsung ke fase *equilibrium cycle*.

Proses simulasi VSOP secara umum dapat dilihat dari flowchart dibawah ini :



Gambar 3. Proses Simulasi VSOP



Gambar-4: Program Dasar VSOP

Pengulangan (iterasi) perhitungan dapat dilakukan pada ciri fisi yang berbeda untuk menjamin efek umpan balik selama perbedaan periode pembakaran, penggantian bahan bakar, dan perubahan tingkat tenaga. Karakteristik riwayat hidup reaktor dapat disimpan untuk perhitungan fungsi kerusakan tenaga pada bahan bakar. Program VSOP tersusun dari 12 modul perhitungan, diantaranya adalah modul TRIGIT, BIRGIT, LIFE, VSOP dan ZUT serta 2 paket program perhitungan pembakaran yaitu Citation dan Thermix.

- (a) Citation merupakan modul perhitungan yang berdasarkan teori difusi sebagai perhitungan fluks neutron di dalam teras dalam bentuk geometri multidimensi,
- (b) Thermix digunakan untuk perhitungan parameter termal-flow.

Analisis Korelasi

Analisis Korelasi merupakan suatu metode statistik yang digunakan untuk menentukan kuat tidaknya (derajat) hubungan linier antara 2 variable atau lebih. Pada analisis korelasi sederhana, meneliti hubungan dan bagaimana eratnya tanpa melihat bentuk hubungan. Jika kenaikan didalam suatu variable diikuti dengan kenaikan variable yang lain, maka dapat dikatakan bahwa kedua variable tersebut mempunyai "korelasi" yang positif. Tetapi jika kenaikan didalam suatu variable diikuti penurunan variable yang lain maka kedua variable tersebut mempunyai korelasi negatif. Jika tidak ada perubahan pada suatu variable, meskipun variable yang lain mengalami perubahan, maka kedua variable tersebut, tidak mempunyai hubungan (uncorrelated). Ukuran yang digunakan untuk mengukur derajat hubungan (korelasi) linier disebut koefisien korelasi (correlation coefficient) yang dinyatakan dengan notasi "r" yang sering dikenal dengan nama "Koefisien Korelasi Pearson atau Product Moment Coefficient of Correlation", dan secara sederhana dapat ditulis sbb:

$$r = \frac{n\sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{n\sum X^2 - (\sum X)^2} \sqrt{n\sum Y^2 - (\sum Y)^2}}$$

Untuk menentukan keeratan hubungan antara kedua variabel tersebut dapat digunakan kriteria Guilford(1956)^[4]:

- 0,00 ≤ r < 0,20 = Hubungan yang sangat kecil dan bisa diabaikan
- 0,20 ≤ r < 0,40 = Hubungan yang kecil (tidak erat)
- 0,40 ≤ r < 0,70 = Hubungan yang moderat
- 0,70 ≤ r < 0,90 = Hubungan yang erat
- 0,90 ≤ r < 1 = Hubungan yang sangat erat

3. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode statistik untuk perhitungan korelasi antara temperatur dan resonance integral. Data diperoleh dari hasil keluaran program VSOP.

Langkah-langkah yang dilakukan adalah sebagai berikut:

- Menyiapkan data nuklir preprocessing tentang HTGR yang akan diolah dengan VSOP. Data Nuklir adalah data-data yang berkaitan dengan terjadinya proses reaksi inti.
- Menjalankan program VSOP secara batch menggunakan 12 modul yang tersedia.
- Mengidentifikasi pasangan nilai temperatur dan resonance integral yang sesuai dari keluaran hasil running program VSOP
- Melakukan uji korelasi Pearson terhadap kedua variable tersebut.
- Menghitung koefisien korelasi antara temperatur dan resonance integral secara statistik
- Menggambarkan Menginterpretasikan hasil perhitungan

4. HASIL dan PEMBAHASAN

Program VSOP dijalankan dengan menggunakan data parameter reaktor HTGR seperti terlihat pada tabel.1 dengan jenis kernel UO2. Data untuk parameter fuel disiapkan melalui modul DATA-2, sedangkan parameter yang dibutuhkan untuk perhitungan resonance integral disiapkan melalui modul ZUT. Untuk dapat menghitung korelasi antara temperatur dan integral resonance maka dipilih opsi pemilihan 6 case, artinya dengan 6 jenis temperature resonance absorber diamati perubahan pada nilai resonancenya. Hasil proses menggunakan program VSOP menampilkan informasi yang lengkap tentang simulasi reaktor sesuai spesifikasi opsi yang dipilih pada preprocessing. Dalam hal ini keluaran VSOP yang diidentifikasi terbatas hanya pada temperatur dan resonance integral yang bersesuaian dengan temperatur tersebut.

Datanya adalah sebagai berikut:

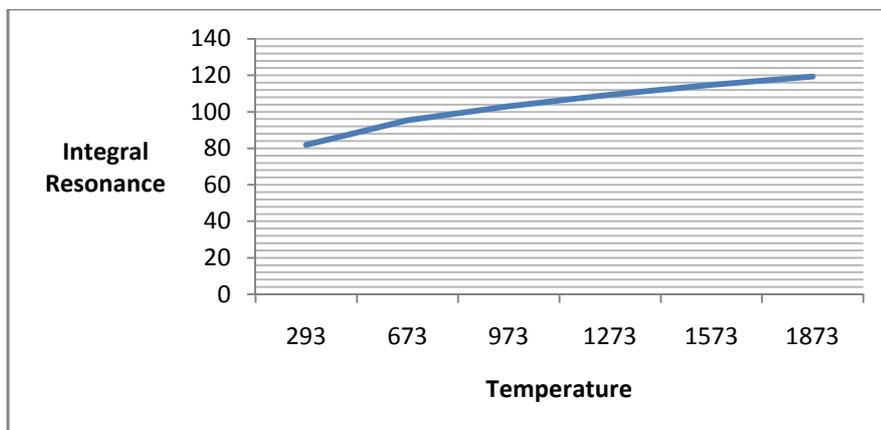
No	Temperatur (⁰ K)	Resonansi
1	293	81.3796
2	673	94.9016
3	973	102.6430
4	1273	108.9410
5	1573	114.2580
6	1883	118.8650

Pada uji ini hipotesis yang digunakan adalah :

H₀ : Tidak ada hubungan yang signifikan antara temperatur yang diberikan pada reaktor dengan integral resonance pada bahan bakar reaktor.

H₁ : Ada hubungan yang signifikan antara temperatur yang diberikan pada reaktor dengan integral resonance pada bahan bakar reaktor.

Hasil penghitungan melalui SPSS diperoleh nilai koefisien korelasi sebesar 0.985552. Berdasarkan kriteria Guilford nilai tersebut menunjukkan hubungan yang sangat erat antara temperatur dan integral resonance. Hubungan positif menunjukkan bahwa semakin besarnya temperatur yang diberikan kepada reaktor maka akan meningkatkan nilai resonansi pada bahan bakar reaktor



Grafik.1 Grafik hubungan antara temperature

Hasil ini menunjukkan bahwa kenaikan temperatur berbanding lurus dengan kenaikan resonance. Kalau secara simulasi temperatur dapat naik atau meningkat tanpa batas dan akan diikuti pula oleh kenaikan resonance.

Tetapi pada kenyataannya kenaikan temperature harus dikendalikan sampai batas tertentu mengingat temperature maksimum HTGR adalah sekitar 1600⁰C

KESIMPULAN.

Berdasarkan hasil perhitungan, terjadi korelasi yang sangat erat antara temperature dengan resonance integral. Kalau ditinjau dari sisi aspek keselamatan, korelasi yang sangat kuat antara temperatur dan resonance integral akan berdampak buruk, misalnya pada temperature tinggi akan menimbulkan resonansi atau getaran yang besar atau sebaliknya. Temperatur yang tinggi atau resonansi yang besar akan merusak kepada material bahan bakar, misalnya kemungkinan terjadinya creep dan fatigue atau melelehnya material. Oleh karena itu diperlukan parameter lain untuk menjaga stabilitas keselamatan bahan bakar yang dapat bekerja secara otomatis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Taufik Nirwanto, mahasiswa FMIPA-UIN yang telah membantu dalam pengolahan data menggunakan SPSS

DAFTAR PUSTAKA

- E. Teuchert, U.Hansen, K.A. erkaitHaas,1990, *VSOP-Computer Code System for Reactor Physics and Fuel Cycle Simulation*, Kernforschungsanlage Jülich, Jül-1649,
- H.J. Rütten, K.A. Haas, H. Brockmann, U. Ohlig, C. Pohl, W. Scherer, 2010,*V.S.O.P. (99/09) Computer Code System for Reactor Physics and Fuel Cycle Simulation; Version 99* , Forschungszentrum Jülich, Jül-4326,
- Rütten,H,J, V. S. O. P. '(94) *Computer Code System for Reactor Physics and Fuel Cycle Simulation; Berichte des Forschungszentrums Jülich*
- Stacey,WM, 2007,*Nuclear Reactor Physics*,2nd ed, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co.KGaA, Weinheim.
- Surbakti, Tukiran, Pinem; 2007, *Analisis Koefisien Reaktivitas Doppler Pada Reaktor PWR Dengan WIMS-ANL*, Prosiding Seminar Nasional ke-13 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, Jakarta
- Trkov,Andrej, 2,002, *Validation of Thermal Cross Sections and Resonance Integrals of SG-23 Evaluated Nuclear Data Library*, IAEA, Vienna