



JOURNAL OF ENERGY, MATERIAL, AND INSTRUMENTATION TECHNOLOGY

Journal Webpage <https://jemit.fmipa.unila.ac.id/>



Perhitungan Laju Reaksi Neutron Dalam Reaktor Supercritical Water Reactor (SCWR) Model Perangkat (Assembly) Heksagonal Berbahan Bakar Uranium

Sharen Herya Reafinola^{(a)*}, Yanti Yulianti^(b) dan Syafriadi

Jurusan Fisika, Universitas Lampung, Bandar Lampung, Indonesia, 35141

Article Information

Article history:

Received November 16th, 2021

Received in revised form December 17th, 2021

Accepted February 19th, 2022

Keywords: uranium, SCWR, neutron reaction rate, SRAC.

Abstract

The calculation of the rate of fission and neutron capture reactions with a filter and without a filter has been carried out using a hexagonal geometry model using the REACT code SRAC program. This research uses uranium-235 and uranium-238 as fuel. The value of material 1 increases along with the increase in the percentage of U-235 fuel enrichment in the value of the neutron fission reaction rate using a detector with and without a filter. While the value of the rate of neutron capture by using a filter or without a filter decreases with the increase in the percentage of enrichment. The value of material 3, the rate of the neutron fission reaction and the neutron capture reaction with a detector using a filter or without a filter, decreased with the increase in the percentage of enrichment in material 1 in the fuel. The volume fraction of Uranium-235 and Uranium-238 fuel has a value of 9.2818% and 7.7995% which are used to analyze the reactions that occur in the reactor. The rate of fission reactions in material 1 and material 3 using a filter and without a filter increases along with the increase in the percentage value of enrichment in the 5th mesh and 5% enrichment, which is 2.0780×10^{-1} reaction/cm³s and 2.2589×10^{-1} reaction/cm³s. The fission reaction rate and the unfiltered capture reaction rate in material 1 with a percentage of 1% have the highest value compared to the filter. In material 3 the rate of fission reaction and the rate of capture reaction with the filter has a greater value than without the filter at the percentage of 1% in the 5th mesh, which is 7.0586×10^{-1} reaction/cm³s and 5% in the 2nd mesh, which is 7.8082×10^{-1} reaction/cm³s.

Informasi Artikel

Proses artikel:

Diterima 16 November 2022

Diterima dan direvisi dari

17 Desember 2021

Accepted 19 Februari 2022

Kata kunci: uranium, SCWR, laju reaksi neutron, SRAC.

Abstrak

Telah dilakukan perhitungan laju reaksi fisi dan penangkapan neutron dengan filter dan tanpa filter model geometri heksagonal menggunakan program SRAC kode REACT. Penelitian ini menggunakan bahan bakar uranium-235 dan uranium-238. Nilai material 1 meningkat seiring dengan peningkatan persentase pengayaan bahan bakar U²³⁵ pada nilai laju reaksi fisi neutron menggunakan detektor dengan dan tanpa filter. Sedangkan nilai laju reaksi penangkapan neutron dengan menggunakan filter ataupun tanpa filter mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya persentase pengayaan. Nilai material 3 laju reaksi fisi neutron dan reaksi penangkapan neutron dengan detektor menggunakan filter ataupun tanpa filter mengalami penurunan seiring dengan meningkatnya persentase pengayaan pada material 1 didalam bahan bakar. Fraksi volume pada bahan bakar Uranium-235 dan Uranium-238 memiliki nilai sebesar 9,2818% dan 7,7995% yang digunakan untuk menganalisis reaksi yang terjadi pada reaktor. Laju reaksi fisi pada material 1 dan material 3 dengan menggunakan filter dan tanpa filter meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase pengayaan pada mesh ke-5 dan pengayaan 5% yaitu sebesar $2,0780 \times 10^{-1}$ reaksi/cm³s dan $2,2589 \times 10^{-1}$ reaksi/cm³s. Laju reaksi fisi dan laju reaksi penangkapan tanpa filter pada material 1 dengan persentase 1% memiliki nilai tertinggi dibandingkan dengan filter. Pada material 3 laju reaksi fisi dan laju reaksi penangkapan dengan filter memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan tanpa filter pada persentase 1% mesh ke-5 yaitu $7,0586 \times 10^{-1}$ reaksi/cm³s dan 5% pada mesh ke-2 yaitu $7,8082 \times 10^{-1}$ reaksi/cm³s.

* Corresponding author.

E-mail address: ^(a)sharenheryareafinola@gmail.com, ^(b)yanti.yulianti@fmipa.unila.ac.id

1. Pendahuluan

Energi berbasis bahan bakar fosil merupakan energi yang telah digunakan penduduk dunia hingga saat ini. Energi fosil tersebut seperti bahan bakar minyak dan gas alam (Frick dan Muliani, 2006) Indonesia saat ini masih bergantung terhadap energi fosil, yaitu sekitar 50% dari yang diperlukan, terutama pada bahan bakar minyak dan gas bumi (Zuhal, 2010). Sebagian besar energi alternatif yang sekarang sedang dikembangkan merupakan energi terbarukan. Adapun energi yang tidak terbarukan salah satunya adalah energi nuklir. Meskipun demikian energi nuklir adalah salah satu energi bersih masa depan karena tidak menghasilkan emisi (Ridwan, 2009).

Energi nuklir adalah salah satu sumber energi alternatif yang layak dikembangkan. Energi yang dihasilkan dalam reaksi nuklir dapat digunakan untuk membangkitkan listrik atau biasa dikenal sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Reaktor nuklir biasanya memanfaatkan bahan fisil dan fertil. Uranium merupakan salah satu bahan fisil yang digunakan untuk bahan bakar utama pembangkit listrik tenaga Nuklir (Kidd, 2009). Uranium merupakan bahan bakar utama pembangkit listrik tenaga Nuklir. Konsep dasar dari sebuah reaktor adalah reaksi fisi dari sebuah material. Uranium alami yang ditemukan di kerak bumi terdiri dari tiga buah isotop yaitu U-238 (99,275%), U-235 (0,720%) dan U-234 (0,005%). Dari ketiga isotop tersebut yang memiliki sifat fisil adalah Uranium-235 (Kidd, 2009).

Pada sebuah inti reaktor terdapat bahan bakar, selongsong, batang kendali dan pendingin reaktor (Tadeus et al., 2010). Ketika sebuah inti ditembakkan oleh sebuah neutron, dengan fase tertentu maka inti akan mengalami pembelahan (fisi) (Zweifel, 1973). Secara umum penambahan jumlah neutron akibat reaksi fisi dapat dirumuskan sebagai k -efektif atau sering disebut dengan faktor multiplikasi efektif. Faktor multiplikasi menggambarkan tingkat kestabilan reaksi fisi di dalam teras reaktor, dimana keadaan stabil (kritis) dicapai jika nilai k -efektif=1 (Pramudya dan Waris, 2005). Energi yang dihasilkan dari sebuah reaktor sangat tergantung pada produksi neutron dari inti reaktor (Martha et al., 2016).

Laju reaksi fisi pada reaktor harus dikendalikan agar perubahan jumlah neutron dapat dibatasi, sehingga hanya satu neutron yang dapat diserap pada pembelahan inti berikutnya, dan dapat diperoleh reaksi berantai sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sesuai kebutuhan (Zweifel, 1973). Perhitungan laju reaksi neutron yang digunakan adalah salah satu reaktor generasi IV, yaitu reaktor air superkritis atau *Supercritical Cooled Water Reaktor* (SCWR), yang dikembangkan oleh *Japan Atomic Energy Research Institute* (JAERI) pada tahun 1978. Menurut Tsiklauri, et al. (2004) pembangunan yang cukup sederhana, ukuran fisik yang lebih kecil namun mampu menghasilkan energi yang besar, sehingga SCWR juga memberikan potensi penghematan dalam hal biaya (Oka, et al., 2003).

Standart Reactor Analysis Code (SRAC) merupakan program komputasi perhitungan neutronik pada beberapa jenis reaktor termal. Secara umum SRAC memiliki suatu *library* data yang terisi tampang lintang semua jenis nuklida yang ada dari berbagai sumber *library* (JENDL, JEF, ENDF). *Library* ini digunakan dalam perhitungan neutronik (fluks neutron) oleh SRAC dengan pendekatan berbeda sesuai maksud penggunaan (Okumura, 2006).

2. Metode Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah seperangkat komputer dengan *Operating System* (OS) Linux Ubuntu dan program SRAC.

2.1 Menentukan Pengayaan

Melakukan perhitungan pengayaan misalkan 1-5% dengan interval 1 nilai densitas atom (*atomic density*) dari U-235 dan U-238 pada reaktor SCWR.

2.2 Menghitung Densitas Atom

Melakukan perhitungan densitas atom U-235 dan U-238 sebagai fungsi pengayaan dengan menggunakan rumus:

$$N = \frac{\rho N_A}{M} \quad (1)$$

dengan,

N = densitas atom (atom/cm³)

ρ = massa jenis (g/cm³)

N_A = bilangan Avogadro (0,6022 x 10²⁴ atom/mol)

M = massa molekul (g/mol)

2.3 Menentukan Geometri Cell

Geometri *cell* REACT pada SRAC berbentuk persegi panjang dengan pin bahan bakar dan selongsong berbentuk lingkaran. Pada penelitian ini model *assembly* akan diubah ke bentuk heksagonal dengan pin bahan bakar dan selongsong berbentuk lingkaran yang asimetris.

2.4 Meng-Input Data pada REACT

Hasil perhitungan densitas atom yang telah didapatkan digunakan sebagai data *input* REACT pada SRAC.

2.5 Perhitungan Laju Reaksi

Laju reaksi dapat dihitung secara manual. Namun, perhitungan dengan cara manual akan memakan waktu yang cukup lama. Oleh karena itu, dilakukan perhitungan laju reaksi dengan REACT pada SRAC.

2.6 Hasil Perhitungan

Perhitungan laju reaksi yang telah selesai akan ditunjukkan dengan *file output* SFT98 dan SFT99. Hasil perhitungan berupa energi dan spektrum neutron, dan laju reaksi detektor dengan dan tanpa filter.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada penelitian ini diawali dengan dengan menentukan spesifikasi tentang desain reaktor dengan menggunakan *software* SRAC. Penggunaan *software* ini untuk menentukan ukuran teras reaktor dan ukuran material dalam perangkat. Spesifikasi inti reaktor yang akan di desain berupa penempatan material. Kemudian dilakukan *peng-inputan* pada program SRAC-REACT untuk menghitung laju reaksi, lalu *meng-input* diameter pada bahan bakar.

3.1 Pengaruh Desain Reaktor Geometri Material Variasi Pengayaan terhadap Laju Reaksi Reaktor SCWR Berbahan Bakar Uranium-235 dan Uranium-238

Perhitungan laju reaksi reaktor menggunakan *software* SRAC untuk menentukan spesifikasi desain pada reaktor, diantaranya mencakup geometri model perangkat, jenis material bahan bakar, struktur grup energi, dan komponen reaktor lainnya. Desain reaktor *Supercritical Water Reactor (SCWR)* menggunakan model *Assembly* yang diinginkan yaitu berbentuk heksagonal pada pin bahan bakar berbentuk lingkaran sesuai pada kode IGT 12 pada SRAC. Bahan bakar berperan dalam berlangsungnya reaksi fisi agar dapat menghasilkan panas yang diperlukan. Dalam penelitian ini, desain reaktor yang digunakan adalah salah satu jenis reaktor generasi IV yaitu SCWR. Berikut ini merupakan hasil nilai laju reaksi pada kedua bahan bakar dengan perhitungan pada program SRAC.

Tabel 1 merupakan nilai dari laju reaksi fisi dan penangkapan neutron menggunakan detektor tanpa filter pada persentase 1 sampai dengan 5% pengayaan U^{235} dihitung dengan program SRAC, agar mempermudah perhitungan dibahan bakar dihitung menjadi 5 bagian (*mesh*) dalam kedua sel, pada program SRAC menggunakan perhitungan sel material 1 dan material 3.

Pada pengayaan U^{235} material 1 laju reaksi fisi neutron nilai persentase tertinggi terdapat di *mesh* ke-2 dengan pengayaan 1% yaitu $6,7534 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s dan nilai tertinggi laju reaksi penangkapan neutron terletak pada *mesh* ke-5 dengan persentase pengayaan 4% yaitu $9,5439 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s. Sedangkan nilai terendah laju reaksi fisi neutron terdapat pada *mesh* ke-3 dengan persentase pengayaan 5% yaitu $1,3403 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s nilai terendah laju reaksi penangkapan neutron terletak pada *mesh* ke-1 dengan presentase pengayaan 4% yaitu $1,7176 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s.

Pada material 3 nilai laju fisi neutron dan laju reaksi penangkapan neutron dapat dilihat bahwa semakin menurun seiring dengan bertambahnya presentase pengayaan pada material 1. Dapat dilihat bahwa nilai tertinggi laju reaksi fisi dan reaksi penangkapan neutron terdapat pada *mesh* ke-5 dengan presentase pengayaan 2% yaitu $5,0615 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s dan $3,0866 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s. Lalu pada material 3 nilai terendah laju reaksi fisi dan reaksi penangkapan neutron terdapat pada *mesh* ke-1 dengan presentase pengayaan 4% yaitu $1,8232 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s dan $1,4105 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s.

Tabel 1. Nilai laju reaksi fisi dan penangkapan pada Matereial 1 dan Material 3 tanpa filter

Pengayaan (%)	Mesh ke-	Material 1 (reaksi/cm ³ s)		Material 3 (reaksi/cm ³ s)	
		Fisi	Penangkapan	Fisi	Penangkapan
1	1	$4,3264 \times 10^{-2}$	$1,9472 \times 10^{-2}$	$1,0582 \times 10^{-3}$	$1,8845 \times 10^{-3}$
	2	$6,7534 \times 10^{-2}$	$3,0747 \times 10^{-2}$	$8,5548 \times 10^{-4}$	$2,2314 \times 10^{-3}$
	3	$1,5886 \times 10^{-1}$	$7,1715 \times 10^{-2}$	$8,3423 \times 10^{-4}$	$3,5067 \times 10^{-3}$
	4	$1,5454 \times 10^{-1}$	$7,0383 \times 10^{-2}$	$8,1411 \times 10^{-4}$	$3,5754 \times 10^{-3}$
	5	$2,2926 \times 10^{-1}$	$1,0186 \times 10^{-1}$	$9,4478 \times 10^{-4}$	$4,8915 \times 10^{-3}$
2	1	$3,9511 \times 10^{-2}$	$1,7548 \times 10^{-2}$	$1,4436 \times 10^{-3}$	$1,8770 \times 10^{-3}$
	2	$6,2304 \times 10^{-2}$	$2,7952 \times 10^{-2}$	$1,4641 \times 10^{-3}$	$2,2456 \times 10^{-3}$
	3	$1,3879 \times 10^{-1}$	$6,2167 \times 10^{-2}$	$2,1395 \times 10^{-3}$	$3,4159 \times 10^{-3}$
	4	$1,4210 \times 10^{-1}$	$6,3878 \times 10^{-2}$	$2,1734 \times 10^{-3}$	$3,6201 \times 10^{-3}$
	5	$2,1560 \times 10^{-1}$	$9,4303 \times 10^{-2}$	$3,0866 \times 10^{-3}$	$5,0615 \times 10^{-3}$
3	1	$3,9727 \times 10^{-2}$	$1,7357 \times 10^{-2}$	$1,4266 \times 10^{-3}$	$1,8494 \times 10^{-3}$
	2	$6,3368 \times 10^{-2}$	$2,7940 \times 10^{-2}$	$1,4508 \times 10^{-3}$	$2,2225 \times 10^{-3}$
	3	$1,4196 \times 10^{-1}$	$6,2478 \times 10^{-2}$	$2,1260 \times 10^{-3}$	$3,3953 \times 10^{-3}$
	4	$1,4537 \times 10^{-1}$	$6,4205 \times 10^{-2}$	$2,1609 \times 10^{-3}$	$3,5988 \times 10^{-3}$
	5	$2,2081 \times 10^{-1}$	$9,4865 \times 10^{-2}$	$3,0677 \times 10^{-3}$	$5,0333 \times 10^{-3}$
4	1	$3,9932 \times 10^{-2}$	$1,7176 \times 10^{-2}$	$1,4105 \times 10^{-3}$	$1,8232 \times 10^{-3}$
	2	$6,4429 \times 10^{-2}$	$2,7939 \times 10^{-2}$	$1,4382 \times 10^{-3}$	$2,2008 \times 10^{-3}$
	3	$1,4513 \times 10^{-1}$	$6,2800 \times 10^{-2}$	$2,1132 \times 10^{-3}$	$3,3757 \times 10^{-3}$

	4	$1,4863 \times 10^{-1}$	$6,4541 \times 10^{-2}$	$2,1474 \times 10^{-3}$	$3,5786 \times 10^{-3}$
	5	$2,2600 \times 10^{-1}$	$9,5439 \times 10^{-2}$	$3,0498 \times 10^{-3}$	$5,0066 \times 10^{-3}$
5	1	$3,9156 \times 10^{-2}$	$1,7797 \times 10^{-2}$	$1,4738 \times 10^{-3}$	$1,9252 \times 10^{-3}$
	2	$6,0701 \times 10^{-2}$	$2,9720 \times 10^{-2}$	$1,4872 \times 10^{-3}$	$2,2859 \times 10^{-3}$
	3	$1,3403 \times 10^{-1}$	$6,1606 \times 10^{-2}$	$2,1624 \times 10^{-3}$	$3,4505 \times 10^{-3}$
	4	$1,3721 \times 10^{-1}$	$6,3221 \times 10^{-2}$	$2,1963 \times 10^{-3}$	$3,6580 \times 10^{-3}$
	5	$2,0780 \times 10^{-1}$	$9,3321 \times 10^{-2}$	$3,1183 \times 10^{-3}$	$5,1085 \times 10^{-3}$

Tabel 2 merupakan nilai dari laju reaksi fisi dan penangkapan neutron menggunakan detektor dengan memakai filter. Dapat dilihat bahwa pada material 1 nilai laju reaksi fisi dan laju reaksi penangkapan neutron akan semakin meningkat dengan bertambahnya presentase pada pengayaan U^{235} . Sedangkan pada material ke-3, nilai laju reaksi fisi dan reaksi penangkapan neutron semakin menurun seiring dengan peningkatan presentasi pengayaan U^{235} .

Tabel 2. Nilai laju reaksi fisi dan penangkapan pada Material 1 dan Material 3 dengan filter

Pengayaan (%)	Mesh ke-	Material 1 (reaksi/cm ³ s)		Material 3 (reaksi/cm ³ s)	
		Fisi	Penangkapan	Fisi	Penangkapan
1	1	$3,8980 \times 10^{-2}$	$1,6897 \times 10^{-2}$	$1,2451 \times 10^{-4}$	$6,2564 \times 10^{-4}$
	2	$6,3718 \times 10^{-2}$	$2,8088 \times 10^{-2}$	$1,9702 \times 10^{-4}$	$9,8188 \times 10^{-4}$
	3	$1,5554 \times 10^{-1}$	$6,9077 \times 10^{-2}$	$4,7436 \times 10^{-4}$	$2,3559 \times 10^{-3}$
	4	$1,5112 \times 10^{-2}$	$6,7446 \times 10^{-2}$	$4,5481 \times 10^{-4}$	$2,2750 \times 10^{-3}$
	5	$2,2589 \times 10^{-1}$	$9,8627 \times 10^{-2}$	$7,0586 \times 10^{-4}$	$3,4876 \times 10^{-3}$
2	1	$3,5318 \times 10^{-2}$	$1,5064 \times 10^{-2}$	$4,7459 \times 10^{-4}$	$6,3061 \times 10^{-4}$
	2	$5,8544 \times 10^{-2}$	$2,5381 \times 10^{-2}$	$7,6277 \times 10^{-4}$	$1,0063 \times 10^{-3}$
	3	$1,3549 \times 10^{-1}$	$5,9623 \times 10^{-2}$	$1,7243 \times 10^{-3}$	$2,2727 \times 10^{-3}$
	4	$1,3870 \times 10^{-2}$	$6,1032 \times 10^{-2}$	$1,7649 \times 10^{-3}$	$2,3257 \times 10^{-3}$
	5	$2,1123 \times 10^{-1}$	$9,1156 \times 10^{-2}$	$2,7933 \times 10^{-3}$	$2,6599 \times 10^{-3}$
3	1	$3,5408 \times 10^{-2}$	$1,4844 \times 10^{-2}$	$4,6080 \times 10^{-4}$	$6,1249 \times 10^{-4}$
	2	$5,9479 \times 10^{-2}$	$2,5335 \times 10^{-2}$	$7,5192 \times 10^{-4}$	$9,9204 \times 10^{-4}$
	3	$1,3853 \times 10^{-1}$	$5,9888 \times 10^{-2}$	$1,7126 \times 10^{-3}$	$2,2572 \times 10^{-3}$
	4	$1,4182 \times 10^{-1}$	$6,1309 \times 10^{-2}$	$1,7531 \times 10^{-3}$	$2,3102 \times 10^{-3}$
	5	$2,1728 \times 10^{-1}$	$9,1660 \times 10^{-2}$	$2,7756 \times 10^{-3}$	$3,6367 \times 10^{-3}$
4	1	$3,5491 \times 10^{-2}$	$1,7176 \times 10^{-2}$	$4,4776 \times 10^{-4}$	$5,9537 \times 10^{-4}$
	2	$6,0416 \times 10^{-2}$	$2,5301 \times 10^{-2}$	$7,4175 \times 10^{-4}$	$9,7861 \times 10^{-4}$
	3	$1,4156 \times 10^{-2}$	$6,0165 \times 10^{-2}$	$1,7015 \times 10^{-3}$	$2,2426 \times 10^{-3}$
	4	$1,4494 \times 10^{-1}$	$6,1599 \times 10^{-2}$	$1,7419 \times 10^{-3}$	$2,2955 \times 10^{-3}$
	5	$2,2233 \times 10^{-1}$	$9,2179 \times 10^{-2}$	$2,7587 \times 10^{-3}$	$3,6147 \times 10^{-3}$
5	1	$3,5196 \times 10^{-2}$	$1,5405 \times 10^{-2}$	$4,9732 \times 10^{-4}$	$6,0042 \times 10^{-4}$
	2	$5,7168 \times 10^{-2}$	$2,5447 \times 10^{-2}$	$7,8082 \times 10^{-3}$	$1,0302 \times 10^{-3}$
	3	$1,3096 \times 10^{-1}$	$5,9177 \times 10^{-2}$	$1,7436 \times 10^{-3}$	$2,2981 \times 10^{-3}$
	4	$1,3404 \times 10^{-1}$	$6,0566 \times 10^{-2}$	$1,7844 \times 10^{-3}$	$2,3514 \times 10^{-3}$
	5	$2,0469 \times 10^{-1}$	$9,0318 \times 10^{-2}$	$2,8227 \times 10^{-3}$	$3,6983 \times 10^{-3}$

Dapat dilihat bahwa pada material 1, nilai tertinggi terdapat pada *mesh* ke-2 dengan pengayaan 5% yaitu $5,7168 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s dan terendah terdapat pada *mesh* ke-2 dengan pengayaan 1% yaitu $6,3718 \times 10^{-3}$ reaksi/cm³s. Sedangkan nilai tertinggi laju reaksi penangkapan neutron terdapat pada *mesh* ke-5 dengan pengayaan 1% yaitu $9,8627 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s dan terendah terdapat pada *mesh* ke-1 dengan pengayaan 3% yaitu $1,4844 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s. Lalu nilai tertinggi laju reaksi fisi dan reaksi penangkapan neutron pada material 3 terdapat pada *mesh* ke-2 dengan pengayaan 3% yaitu $7,5192 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s dan $9,9204 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s. Setelah itu nilai terendah laju reaksi fisi dan reaksi penangkapan neutron terdapat pada *mesh* ke-5 dengan pengayaan 2% yaitu $7,8082 \times 10^{-3}$ reaksi/cm³s dan $1,0302 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s.

Dari data tabel tersebut dapat diketahui bahwa nilai laju reaksi penangkapan neutron yang diperoleh merupakan hasil perhitungan yang dilakukan oleh detektor neutron, bahwa detektor neutron mendeteksi partikel-partikel hasil ionisasi sekunder yang disebabkan karena adanya interaksi antara neutron dengan material. Sedangkan neutron itu sendiri merupakan partikel yang bermuatan, sehingga neutron dapat berinteraksi langsung dengan materi yang dilewatinya.

3.2 Pengaruh Variasi Pengayaan terhadap Fraksi Volume Bahan Bakar Uranium dengan Filter dan tanpa Filter

Perhitungan fraksi volume juga dilakukan untuk menganalisis reaksi yang terjadi direaktor, persentase setiap material yang digunakan. Fraksi volume bahan bakar adalah perbandingan volume bahan bakar terhadap keseluruhan volume pada pin bahan bakar yaitu yang meliputi bahan bakar, selongsong dan moderator. Bahan bakar dan *cladding* berbentuk lingkaran. Besarnya fraksi volume dapat diketahui dari jari-jari setiap material. Adapun persentase fraksi volume dari bahan bakar 1, bahan bakar 2, *cladding* 1, dan *cladding* 2 ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Fraksi volume dari material yang digunakan

Material	Jari-jari (cm)	Luas (cm ²)	Fraksi volume (%)
Bahan bakar 1	1,2	4, 5216	9, 2818
<i>Cladding</i> 1	1,7	4, 553	9, 3465
Bahan bakar 2	1,1	3, 7994	7, 7995
<i>Cladding</i> 2	1,5	3, 2656	6, 7037
Moderator	7,5	97,7229	97, 7229

Setelah menentukan fraksi volume pada reaktor, selanjutnya adalah menghitung setiap densitas atom pada masing-masing material yang digunakan pada penelitian. Densitas atom setiap nuklida dapat ditentukan menggunakan persamaan 8. Berikut merupakan contoh perhitungan densitas atom UO₂.

$$\begin{aligned}
 N(UO_2) &= \frac{\rho(UO_2) \times N_A}{M(UO_2)} \\
 &= \frac{10,01369 \left(\frac{g}{cm^3}\right) \times 0,6022 \times \left(\frac{Molekul}{mol}\right)}{267 \left(\frac{g}{mol}\right)} \\
 &= 2,2585 \times 10^{22} \left(\frac{Molekul}{mol}\right) \\
 N(O) &= 2xN(UO_2) \\
 &= 2 \times 2,2585 \times 10^{22} \left(\frac{atom}{cm^3}\right) = 4,517 \times 10^{22} \left(\frac{atom}{cm^3}\right) \\
 &= 0,04517 \times 10^{24} \left(\frac{atom}{cm^3}\right)
 \end{aligned}$$

Setelah perhitungan densitas atom selesai, kemudian pada bahan bakar dilakukan pengayaan pada U²³⁵. Pengayaan bertujuan untuk memperkaya jumlah isotop pada U²³⁵ dalam bahan bakar. Perhitungan pada pengayaan dilakukan dengan persentase 1 sampai 5% dengan bahan bakar 1 dan bahan bakar 2 pengayaan 1%. Berikut merupakan hasil perhitungan densitas atom yang ditunjukkan pada Tabel 3.

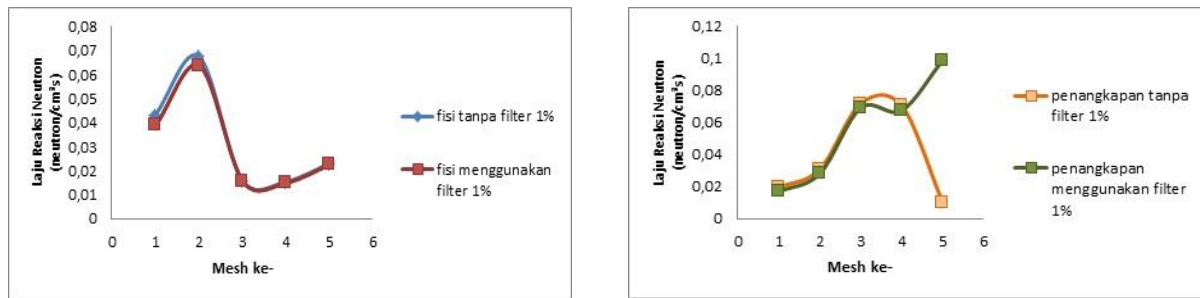
Tabel 5. Densitas atom dan pengayaan bahan bakar

Pengayaan (%)	U ²³⁵ × 10 ²⁴ (atom/cm ³)	U ²³⁸ × 10 ²⁴ (atom/cm ³)	O × 10 ²⁴ (atom/cm ³)
1	2,2585 × 10 ⁻²	2,2359 × 10 ⁻⁴	4,517 × 10 ⁻²
2	4,517 × 10 ⁻²	2,2133 × 10 ⁻⁴	4,517 × 10 ⁻²
3	6,7755 × 10 ⁻²	2,1907 × 10 ⁻⁴	4,517 × 10 ⁻²
4	9,034 × 10 ⁻²	2,1681 × 10 ⁻⁴	4,517 × 10 ⁻²
5	1,1295 × 10 ⁻²	2,1455 × 10 ⁻³	4,517 × 10 ⁻²

Hasil dari perhitungan densitas atom lalu digunakan untuk meng-input REACT pada *software* SRAC untuk menghitung laju reaksi neutron. Setelah nilai densitas atom di *input*, lalu *running* program dan nilai laju reaksi neutron dan laju reaksi penangkapan neutron dari bahan bakar akan diperoleh. Hasil dari perhitungan densitas atom kemudian menjadi input REACT pada program SRAC untuk dilakukan perhitungan laju reaksi neutron. Penelitian sebelumnya menggunakan jari-jari yang lebih kecil pada setiap bahan bakar, sehingga *cladding* pada setiap bahan bakar memiliki luas yang lebih kecil.

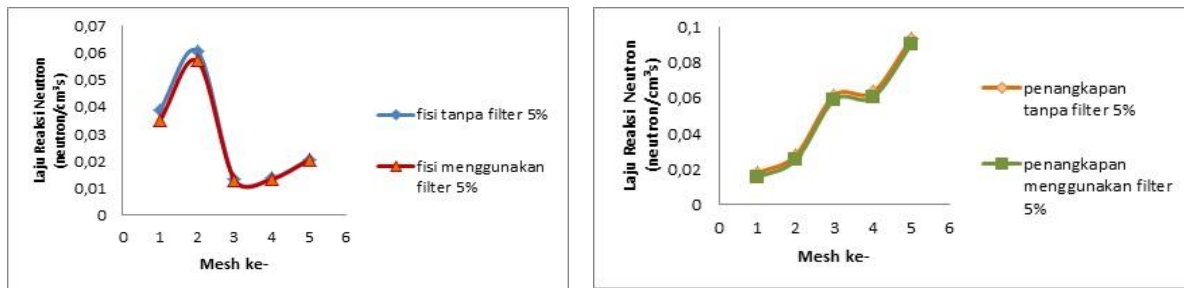
3.3 Pengaruh Variasi Pengayaan terhadap Perbandingan Laju Reaksi Neutron dengan Filter dan tanpa Filter

Pada Gambar 1 material 1 laju reaksi fisi dan laju reaksi penangkapan neutron menggunakan filter dan tanpa filter pada pengayaan 1% dapat dilihat bahwa laju reaksi tanpa filter memiliki puncak yang lebih tinggi dibandingkan menggunakan filter. Sedangkan laju reaksi penangkapan neutron menggunakan filter lebih tinggi puncaknya dibandingkan tanpa filter.



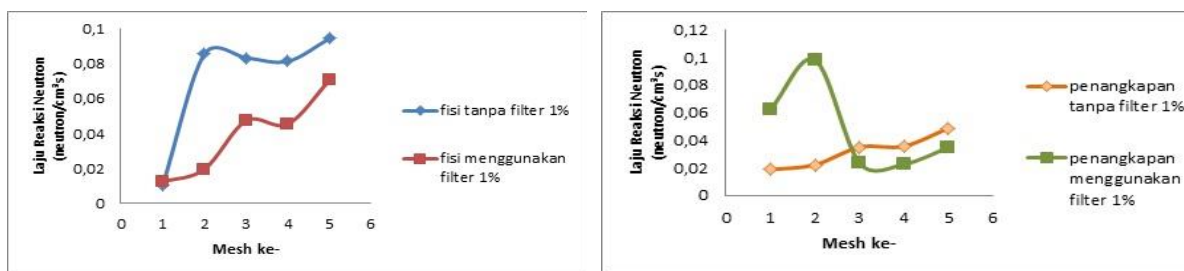
Gambar 1. Laju reaksi fisi dan penangkapan menggunakan filter dan tanpa filter pengayaan 1% pada material 1

Pada Gambar 2 dengan pengayaan 5% laju reaksi fisi dan penangkapan neutron menggunakan filter dan tanpa filter. Dapat dilihat bahwa laju reaksi fisi tanpa filter memiliki puncak yang lebih tinggi dibanding laju reaksi fisi menggunakan filter. Sedangkan laju reaksi penangkapan tanpa filter memiliki puncak yang lebih tinggi dibandingkan laju reaksi penangkapan tanpa filter.



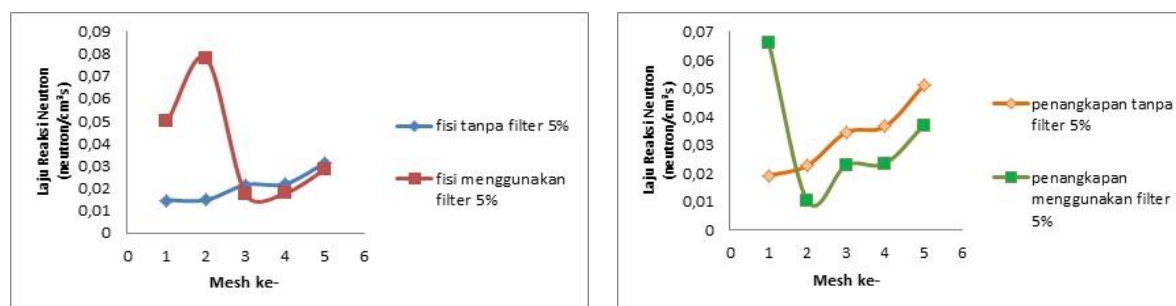
Gambar 2. Laju reaksi fisi dan penangkapan menggunakan filter dan tanpa filter pengayaan 5% pada material 1

Pada Gambar 3 pengayaan 1% dengan laju reaksi fisi dan laju reaksi penangkapan neutron pada material 3, dapat dilihat bahwa laju reaksi fisi tanpa filter lebih tinggi puncaknya dibanding laju reaksi fisi menggunakan filter. Sedangkan laju reaksi penangkapan menggunakan filter lebih tinggi puncaknya dibandingkan tanpa filter.



Gambar 3. Laju reaksi fisi dan penangkapan menggunakan filter dan tanpa filter pengayaan 1% pada material 3

Pada Gambar 4 pengayaan 5% laju reaksi fisi dan laju reaksi penangkapan tanpa filter dan menggunakan filter, dapat dilihat bahwa pada laju reaksi fisi menggunakan filter puncaknya lebih tinggi dibandingkan tanpa filter. Sedangkan pada laju reaksi penangkapan menggunakan filter puncaknya lebih tinggi dibandingkan tanpa filter.



Gambar 4. Laju reaksi fisi dan penangkapan menggunakan filter dan tanpa filter pengayaan 5% pada material 3

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, analisis dan pembahasan diperoleh bahwa Laju reaksi fisi pada material 1 dan material 3 dengan menggunakan filter dan tanpa filter meningkat seiring dengan meningkatnya nilai persentase pengayaan U^{235} . Nilai tertinggi pada laju reaksi fisi neutron material 1 tanpa filter terdapat pada mesh ke-2 dengan pengayaan 1% yaitu sebesar $3,0747 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s. Sedangkan laju reaksi penangkapan neutron menggunakan filter meningkat seiring meningkatnya persentase pada U^{235} dengan pengayaan 1% mesh ke-5 yaitu dengan nilai sebesar $9,8627 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s. Kemudian Laju reaksi fisi neutron tanpa filter pada material 3 meningkat seiring dengan meningkatnya persentase pada pengayaan 1% mesh ke-5 yaitu sebesar $9,4778 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s. Hal ini dikarenakan meningkatnya persentase pada pengayaan U^{235} pada pin bahan bakar. Sedangkan laju reaksi penangkapan menggunakan filter pada material 1 dengan persentase 1% mesh ke-2 memiliki nilai tertinggi dibandingkan dengan filter yaitu sebesar $9,8181 \times 10^{-2}$ reaksi/cm³s.

5. Daftar Pustaka

- Frick, H dan Muliani, H. 2006. *Arsitektur Ekologis Kanikius*. Yogyakarta. Hal. 161.
- Kidd, S.W. 2009. *Nuclear Fuel Resources*. New York: CRC Press. Hal. 85.
- Oka, Y., Koshizuki, S., Ishiwatari, Y., dan Yamaji, A. 2003. *Conceptual Design of High Temperature Reactor Cooled by Supercritical Light Water*. ICAAP. Cordoba: Spain. Hal. 77.
- Okumura, K. 2006. *Introduction of SRAC for Reactor Physics Analyses*. JAEA. Japan. Hal. 10-15.
- Martha, R., Shafii, M. A., dan Afdal. 2016. Analisis Laju Reaksi Neutron Dalam Sel Bahan Bakar Nuklir pada Reaktor Cepat. *Jurnal Ilmu Fisika*. Vol. 8. No.2. Hal. 70-76.
- Pramuditya, S dan Abdul, W.2005. *Analisis Neutronik, Termal-hidrolik, dan Termodinamik pada Perancangan Pressurized Water Reactor*. <http://www.scribd.com/doc/25692769/61/Gambar4-6-Profil-Power-Density-Aksial>. Diakses 25 April 2020.
- Ridwan, N. 2009. *The Extreme Future, 10 Tren Utama yang membentuk Ulang 20 Tahun Kedepan*. Tangerang. Hal. 43.
- Tadeus, D.Y., Budi, S., dan Iwan, S. 2010. Simulasi Kendali Daya Reaktor Nuklir dengan Teknik Kontrol Optimal. *Jurnal Universitas Diponegoro Transmisi* 12. Vol.1. Hal. 8-13.
- Zweifel, P.F. 1973. *Reactor Physics*. McGraw-Hill. USA. Hal. 74.
- Zuhal. 2010. *Knowledge Platform Kekuatan Daya Saing dan Innovation*. Gramedia Pustaka Utama. Jakarta. Hal. 203.