

Penentuan K_{eff} dan Waktu Siklus Operasi Reaktor TRIGA 2000 Untuk Variasi Bahan Bakar Tipe UZrH

Rasito^{a)}, Fiqhri H.M., dan S. Permana

Laboratorium Fisika Nuklir Kelompok Keilmuan Fisika Nuklir dan Biofisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung,
Jl. Ganesha no. 10 Bandung, Indonesia, 40132

^{a)}Email: rasito20@gmail.com (corresponding author)

Abstrak

Telah dilakukan perhitungan k_{eff} dan waktu siklus operasi reaktor TRIGA 2000 untuk variasi tiga bahan bakar tipe UZrH. Terdapat tiga tipe bahan bakar TRIGA yaitu tipe pertama UZrH 8,5-20%, kedua UZrH 12-20%, dan ketiga UZrH-Er 20-20%. Perhitungan dilakukan dengan memodelkan 91 bahan bakar tipe UZrH yang ditempatkan di ring B-F dalam teras reaktor TRIGA. Metode Monte Carlo dengan program komputer MCNPX digunakan untuk menghitung fluks neutron di tiap bahan bakar dan k_{eff} teras. Perubahan komposisi bahan bakar hasil fisi dan aktivasi selama waktu operasi dihitung menggunakan program ORIGEN. Dengan MCNP-ORIGEN dihitung waktu siklus operasi reaktor berdasarkan nilai k_{eff}

<1. Pengoperasian reaktor TRIGA menggunakan bahan bakar tipe pertama dihasilkan k_{eff} awal 1,062 dengan waktu siklus operasi 60 hari, tipe kedua dihasilkan k_{eff} awal 1,141 dan waktu operasi 450 hari, dan tipe ketiga dihasilkan k_{eff} awal 1,111 dan waktu operasi 870 hari

Kata-kata kunci: Nilai k_{eff} , Waktu operasi, Reaktor TRIGA, Tipe UZrH, MCNPX, Origen

PENDAHULUAN

TRIGA 2000 adalah reaktor riset termal pertama di Indonesia yang dapat dimanfaatkan untuk penelitian dan irradiasi dengan daya maksimum 2 MW. Dalam pengoperasiannya, reaktor TRIGA menggunakan bahan bakar tipe uranium zirkonium hidrida (UZrH). Bahan bakar UZrH berbentuk batang silinder berongga dengan panjang 38,1 cm dan diameter 3,65 cm, yang didalamnya ditempatkan batang zirkonium (Zr). Pada ujung atas dan bawah dipasang grafit (C) dan kelongsong bahan bakar dibuat dari bahan stainless steel (SS).

Terdapat beberapa tipe bahan bakar reaktor TRIGA, tiga diantaranya yaitu UZrH 8.5-20%, UZrH 12-20%, dan UZrH-Er 20-20% [1]. Reaktor TRIGA dapat dioperasikan menggunakan salah satu atau campuran beberapa tipe bahan bakar UZrH. Pada makalah ini disajikan hasil simulasi operasi reaktor TRIGA jika menggunakan salah satu tipe dari tiga tipe bahan bakar UZrH. Simulasi tersebut dilakukan untuk menghitung nilai k_{eff} dan waktu siklus operasi reaktor TRIGA dengan variasi tiga tipe bahan bakar. Simulasi dilakukan menggunakan metode Monte Carlo dengan program komputer MCNP dan ORIGEN.

Berdasarkan hasil simulasi tersebut dapat diketahui tipe bahan bakar mana yang memberikan waktu operasi reaktor yang paling lama.

METODE

Pengoperasian reaktor TRIGA 2000 akan disimulasikan dengan metode Monte Carlo menggunakan program komputer MCNPX. Program MCNPX menghitung fluks dan energi neutron di posisi bahan bakar serta nilai k_{eff} dari teras reaktor. Adapun produk-produk isotop hasil fisi dan aktivasi neutron pada bahan

bakar dihitung menggunakan ORIGEN. Untuk dapat dilakukan perhitungan diperlukan beberapa model yaitu geometri bahan bakar dan konfigurasi teras reaktor.

Tipe bahan bakar UZrH

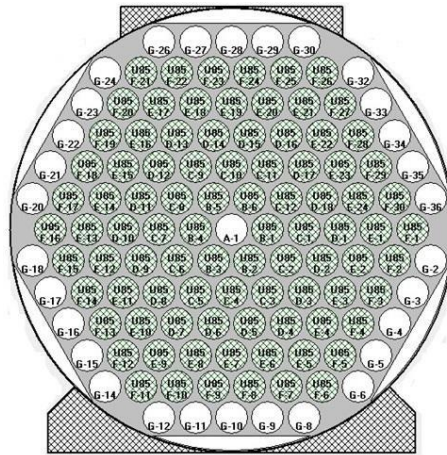
Terdapat tiga tipe bahan bakar UZrH yang akan divariasikan dalam simulasi keff dan waktu operasi reaktor TRIGA. Ketiga tipe bahan bakar tersebut adalah UZrH 8.5-20%, UZrH 12-20%, dan UZrH-Er 20-20%, dengan komposisi material masing-masing tipe diperlihatkan pada Tabel 1. Ketiga tipe bahan bakar tersebut memiliki kesamaan persen berat uranium yaitu 20%. Namun kadar ^{235}U berbeda yaitu 8,5%, 12%, dan 20%. Tipe ketiga selain memiliki berat jenis paling besar yakni 6,439 g/cc, dia juga ada unsur lain sebagai tambahan yaitu Erbium (Er).

Tabel 1. Komposisi tiga bahan bakar TRIGA

		Bahan Bakar TRIGA		
		UZrH 8.5-20%	UZrH 12-20%	UZrH-Er 20-20%
Densitas	g/cc	5.799	5.94	6.439
			5	
^{235}U	g	38	55	99
^{238}U	g	152	220	396
Zr	g	2009.76	1981.632	1934.17
		2		
H	g	35.5	35.035	34.19
				6
Er	g	-	-	11.67
				3

Konfigurasi teras TRIGA

Teras reaktor TRIGA 2000 memiliki bentuk heksagonal dengan 121 lubang posisi bahan bakar. Posisi pusat adalah A1, kemudian ring B ada 6 lubang, ring C ada 12 lubang, ring D ada 18 lubang, ring E ada 24 lubang, ring F ada 30 lubang, dan ring G ada 30 lubang. Posisi lubang di teras tersebut dapat digunakan untuk penempatan batang kendali ataupun bahan iradiasi.

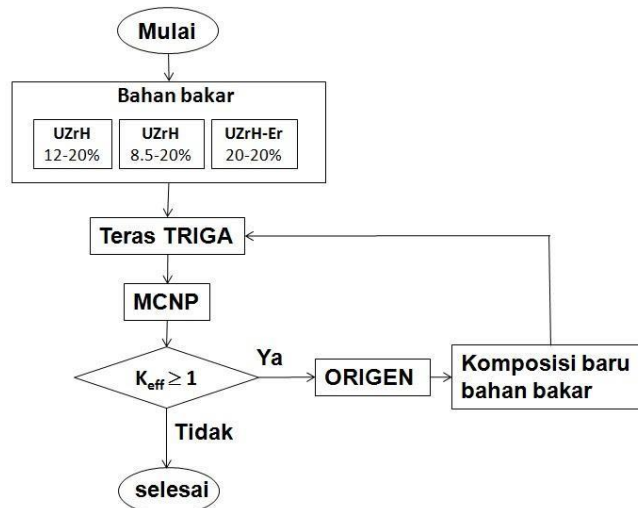


Gambar 2. Konfigurasi teras reaktor TRIGA 2000 dengan 82 bahan bakar UZrH

Tidak semua ring di dalam teras TRIGA digunakan dalam simulasi. Hanya ring B hingga ring F yang digunakan untuk menempatkan 82 bahan bakar. Selain karena efisiensi waktu simulasi hal tersebut juga mempertimbangkan kondisi minimal dapat kritis untuk 2 MW yaitu ring B-F. Dalam simulasi juga tidak dipasang batang kendali karena untuk mendapatkan k_{eff} maksimum. Pada kenyataannya, dalam operasi reaktor meniscayakan dipasang batang kendali yaitu untuk mengatur nilai $k_{\text{eff}} \approx 1$.

Perhitungan k_{eff} dan waktu siklus operasi

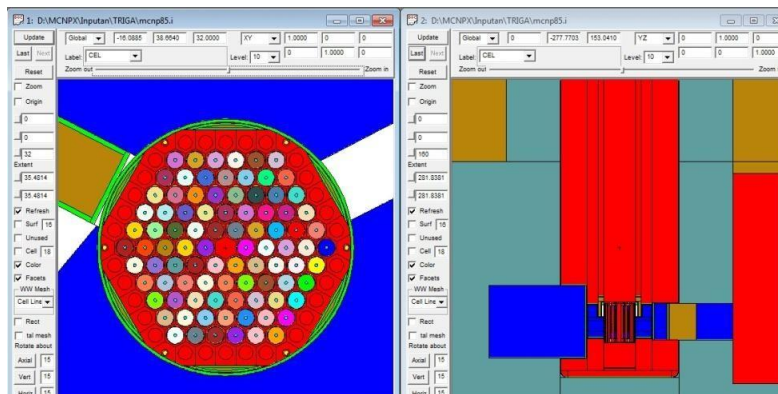
Dibuat tiga inputan untuk tiga konfigurasi teras reaktor TRIGA dengan masing-masing tipe bahan bakar. Masing-masing inputan MCNPX dijalankan dalam komputer untuk mendapatkan nilai k_{eff} dan fluks neutron di tiap posisi bahan bakar [2]. Nilai fluks neutron hasil MCNPX digunakan sebagai inputan ORIGIN untuk menghitung jumlah isotop yang dihasilkan dari reaksi fisi, aktivasi, dan peluruhan di bahan bakar. Hasil perhitungan ORIGIN diperoleh komposisi material baru dalam bahan bakar [3]. Komposisi baru dalam batang bahan bakar tersebut selanjutnya digunakan untuk membuat inputan MCNPX baru untuk menghitung nilai k_{eff} baru. Demikian hal tersebut dilakukan hingga dicapai nilai $k_{\text{eff}} > 1$ yang artinya teras reaktor sudah tidak kritis. Algoritma perhitungan yang digunakan ini adalah sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Algoritma simulasi

HASIL DAN PEMBAHASAN

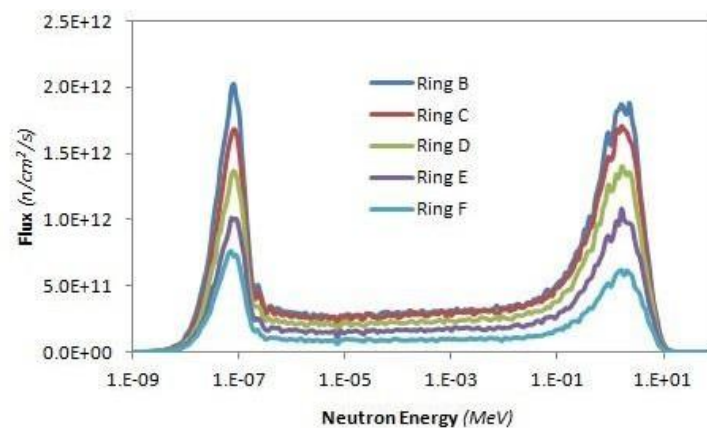
Telah dibuat tiga input MCNPX untuk tiga tipe bahan bakar dalam kondisi baru dengan masing-masing 82 buah yang terdistribusi di ring B-F teras reaktor TRIGA sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4. Inputan MCNPX dijalankan menggunakan komputer dengan processor Intel core i5- 2.3 GHz, RAM 4 GB, dan sistem operasi Windows 8.1. Masing-masing inputan MCNPX dijalankan dalam komputer tersebut untuk mendapatkan nilai k_{eff} awal dan fluks neutron maupun daya di tiap bahan bakar. Definisi sumber dalam inputan digunakan KCODE dan dua tipe tally yaitu F4 untuk fluks dan F7 untuk daya. Parameter perhitungan model sumber menggunakan KCODE dengan 100000 neutron awal, 250 siklus efektif dan 50 siklus tak efektif. Waktu yang diperlukan untuk masing-masing input menggunakan komputer tersebut rata-rata 104 menit. Data tampak lintang interaksi neutron dalam perhitungan MCNPX ini digunakan library ENDF/B-VI.



Gambar 4. Geometri teras TRIGA 2000 dalam MCNP

Beragam posisi bahan bakar di teras reaktor umumnya memiliki bentuk spektrum neutron yang sama hanya nilai total fluks yang berbeda. Gambar 5 memperlihatkan spektrum neutron bahan bakar di posisi ring berbeda. Dengan geometri teras dan kondisi bahan bakar yang simetri maka dalam ring yang sama dihasilkan fluks neutron yang relatif sama. Bahan bakar di ring B memiliki total fluks neutron 6.3×10^{13} n/cm²/s, di ring C adalah 5.6×10^{13} n/cm²/s, di ring D adalah 4.6×10^{13} n/cm²/s, di ring E adalah 3.4×10^{13} n/cm²/s, dan di ring F adalah 2.1×10^{13} n/cm²/s.

Fluks neutron yang berbeda untuk tiap ring berbeda dan sama untuk bahan bakar di ring yang sama menghasilkan laju reaksi fisi dan aktivasi yang juga sama. Misalnya pada operasi ke-50 hari untuk bahan bakar tipe UZrH 8.5-20% di ring B fraksi ²³⁵U menjadi 19,08 %, di ring C menjadi 19,24 %, di ring D menjadi 19,37 %, di ring E menjadi 19,54 %, dan di ring F menjadi 19,64 %. Laju reaksi fisi yang relatif sama dalam bahan bakar di ring yang sama menghasilkan daya yang di bahan bakar yang juga sama. Pada bahan bakar di ring B diperoleh daya 3.9×10^4 watt, di ring C 3.3×10^4 watt, di ring D 2.7×10^4 watt, di ring E 2.1×10^4 watt, dan di ring F 1.6×10^4 watt.

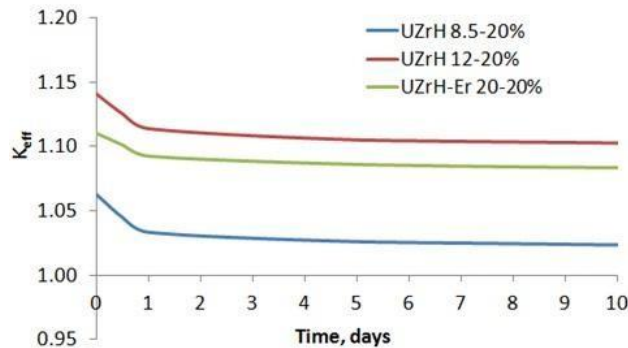


Gambar 4. Spektrum neutron bahan bakar di tiap ring teras

Nilai k_{eff} teras TRIGA

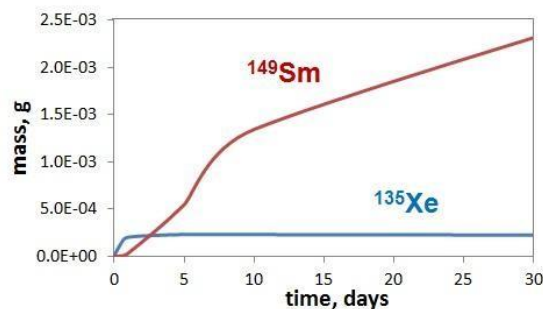
Telah diperoleh nilai k_{eff} untuk tiga konfigurasi teras TRIGA dengan tipe bahan bakar berbeda. Untuk bahan bakar tipe UZrH 8.5-20% diperoleh k_{eff} awal 1,062, tipe UZrH 12-20% diperoleh k_{eff} awal 1,141, dan tipe UZrH-Er 20-20% diperoleh k_{eff} awal 1,111. Nilai k_{eff} selanjutnya adalah dihitung setelah reaktor dioperasikan 0,5 hari. Waktu operasi dibawah 1 hari dilakukan perhitungan k_{eff} karena umumnya akan terjadi penurunan k_{eff} yang signifikan dibandingkan operasi hari-hari berikutnya. Hal tersebut disebabkan karena munculnya nuklida ¹³⁵Xe dan ¹⁴⁹Sm yang disebut sebagai “racun neutron” dikarenakan memiliki tampang lintang neutron yang sangat besar. Untuk dapat menghitung jumlah isotop yang dihasilkan maka dalam input ORIGEN dimasukkan lama waktu operasi reaktor. Hasilnya adalah komposisi baru bahan bakar setelah operasi 0.5 hari. Komposisi baru bahan bakar tersebut digunakan untuk membuat inputan MCNPX yang kemudian dijalankan dalam komputer untuk mendapatkan k_{eff} baru. Kemudian dilakukan hal yang sama untuk waktu

operasi selanjutnya. Hasil perhitungan k_{eff} hingga waktu operasi 10 hari diperlihatkan pada Gambar 5. Perhitungan k_{eff} ini dilakukan menggunakan data tampang lintang digunakan ENDF/B-VI. Jika menggunakan data tampang lintang ENDF/B-VII dapat dihasilkan k_{eff} yang lebih besar [4,5]



Gambar 5. Nilai k_{eff} untuk 10 hari operasi

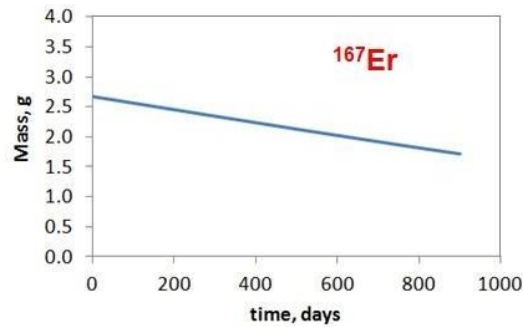
Terjadi penurunan nilai k_{eff} secara signifikan pada operasi reaktor 0.5 – 1 hari terutama untuk tipe bahan bakar UZrH 8.5-20% dan UZrH 12-20%. Penurunan signifikan k_{eff} tersebut menunjukkan banyaknya neutron dalam teras yang hilang atau terserap dan tidak menghasilkan fisi. Serapan neutron secara signifikan dapat diakibatkan dari adanya nuklida penyerap neutron yang muncul sebagai hasil fisi. Dari sekian banyak hasil fisi terdapat nuklida ^{135}Xe dan ^{149}Sm yang merupakan penyerap neutron. Tampang lintang neutron dari ^{135}Xe adalah 2.700.000 barn dan ^{149}Sm adalah 42.000 barn. Meski konsentrasinya kecil namun karena ^{135}Xe memiliki tampang lintang sangat besar maka neutron di teras akan banyak diserapnya. Jumlah isotop ^{135}Xe dan ^{149}Sm untuk bahan bakar tipe UZrH 8.5-20% di dalam ring B diperlihatkan pada Gambar 6.



Gambar 6. Produk fisi ^{135}Xe dan ^{149}Sm dalam bahan bakar

Berbeda dengan yang ketiga, bahan bakar tipe UZrH-Er 20-20% tidak mengalami penurunan k_{eff} signifikan pada awal operasi. Hal tersebut disebabkan karena unsur Erbium (Er) yang ada di dalam bahan bakar. Unsur Er memiliki tampang lintang neutron yang cukup besar. Isotop ^{167}Er (22%) memiliki tampang lintang 649 barn dan 2970 barn untuk daerah resonansi. Sehingga k_{eff} awal untuk bahan bakar tipe ini sudah rendah dari awal. Namun demikian, penangkapan neutron oleh Er seiring dengan waktu operasi akan menurunkan jumlahnya di dalam bahan bakar. Penurunan jumlah Er di dalam bahan bakar tipe UZrH-Er 20-20% di ring B diperlihatkan pada Gambar 7. Penurunan jumlah Er di dalam bahan bakar berimplikasi kepada rendahnya penangkapan neutron sehingga penurunan k_{eff} fungsi waktu

operasi tidak besar. dampaknya umur bahan bakar atau waktu siklus operasi reaktor menjadi lebih panjang. Erbium memiliki tampang lintang neutron termal lebih kecil dibanding Gadolinium dan mampu meminimasi reaktivitas lebih besar [6,7,8]

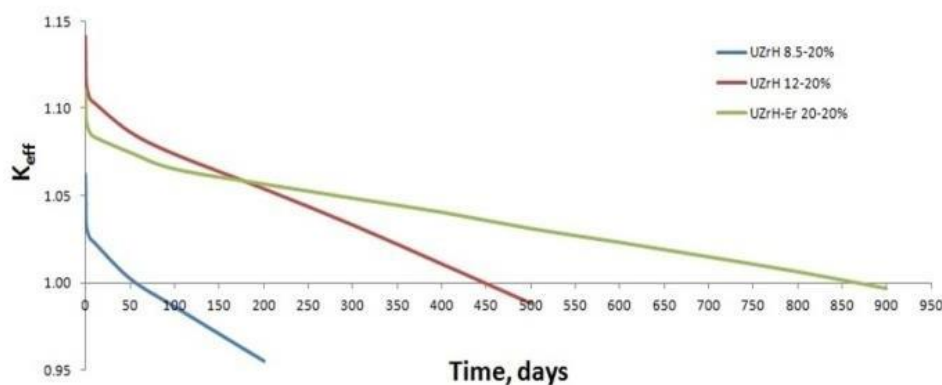


Gambar 7. Penurunan jumlah ^{167}Er dalam bahan bakar tipe UZrH-Er

Waktu siklus operasi

Perhitungan nilai k_{eff} dari input MCNPX dengan modifikasi komposisi material hasil ORIGEN dilakukan hingga waktu operasi tertentu untuk mendapatkan pola penurunan k_{eff} . Pola penurunan nilai k_{eff} sekaligus digunakan untuk memprediksi waktu siklus operasi untuk konfigurasi bahan bakar yang dimodelkan. Reaktor akan mencapai kondisi subkritis ketika nilai $k_{\text{eff}} < 1$. Simulasi menggunakan MCNP- ORIGEN fungsi waktu operasi reaktor diperoleh k_{eff} sebagai fungsi waktu operasi.

Pada Gambar 8 diperlihatkan hasil simulasi k_{eff} sebagai fungsi waktu operasi reaktor TRIGA untuk variasi tiga bahan bakar. Simulasi dilakukan hingga nilai $k_{\text{eff}} \leq 1$. Untuk bahan bakar tipe UZrH 8.5-20% diperoleh $k_{\text{eff}} \leq 1$ setelah waktu operasi 60 hari, tipe UZrH 12-20% 450 hari, dan tipe UZrH-Er 20-20% setelah 870 hari. Penambahan erbium dalam bahan bakar memperpanjang siklus operasi reaktor [9]



Gambar 8. Nilai k_{eff} dan waktu siklus operasi reactor

KESIMPULAN

Reaktor TRIGA dapat mencapai kritis pada daya 2 MW dengan tipe bahan bakarnya minimal menempati ring B sampai F. Dengan tipe UZrH 8.5-20% waktu operasi reaktor 60 hari, tipe UZrH 12-20% 450 hari, dan tipe UZrH-Er 20-20% 870 hari. Waktu operasi paling panjang dari bahan bakar tipe UZrH-Er 20-20% selain karena fraksi berat U paling besar juga terdapat Er sebagai penyerap neutron

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada pihak ITB atas bantuannya sehingga kegiatan ini terlaksana dengan baik. Terima kasih juga kami sampaikan kepada Bapak Ilham Yazid atas izinnya dalam menggunakan aplikasi MOBCCS untuk pengolahan output MCNP ke ORIGEN.

DAFTAR PUSTAKA

1. IAEA, History, Development, and Future of TRIGA research reactor, Technical Report Series No.482, 2016
2. Pelowitz, D. B., *MCNPX 2.6.0 user manual*, Los Alamos: Los Alamos National Laboratory (LA-CP-07-1473), 2008
3. A. G. Croff, "A user's manual for the ORIGEN2 computer code," Tech. Rep. ORNL/TM-7175, Oak Ridge National Laboratory, 1980.
4. Luka Snoj, Andrej Trkov, Matjaž Ravnik, Testing of Cross Section Libraries for TRIGA Criticality Benchmark, Proceedings of the International Conference Nuclear Energy for New Europe, Portorož, Slovenia, Sept. 10-13, 2007
5. Alvie Asuncion-Astronomo, Žiga Štancar, Tanja Goričanec, Luka Snoj, Computational design and characterization of a subcritical reactor assembly with TRIGA Fuel, Nuclear Engineering and Technology · October 2018
7. R A Khrais, G V Tikhomirov, I S Saldikov and A D Smirnov, Neutronic analysis of VVER-1000 fuel assembly with different types of burnable absorbers using Monte-Carlo code Serpent, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1189 (2019)
8. Riham Refeat, Optimum Erbium Isotopes Composition and Distribution for Power Flattening in Advanced PWR Fuel Assembly, Journal of Materials Science and Engineering B 6 (3-4) (2015) 85-93
9. Vladimir BARCHEVTSEV , Vladimir ARTISYUK & Hisashi NINOKATA, Concept of Erbium Doped Uranium Oxide Fuel Cycle in Light Water Reactors, Journal of NUCLEAR SCIENCE and TECHNOLOGY, Vol. 39, No. 5, p. 506–513 (May 2002)
10. Artur C. Freitas, Elita F. U. Carvalho, Study of the densification of uranium-erbium system, *International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2017*