

Analisis Ukuran Teras dan Rasio H/D pada *Molten Salt Fast Reactor* dalam Tinjauan Neutronik

Puti Berkah Azurah^{1*}, Dian Fitriyani¹, Sidik Permana²

¹Laboratorium Fisika Nuklir, Jurusan Fisika,
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas,
Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia

²Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 15 Desember 2020
Direvisi: 08 Januari 2021
Diterima: 25 Januari 2021

Kata kunci:

Reaktor cepat
Molten salt
SRAC
Neutronik

Keywords:

Fast Reactor
Molten salt
SRAC
Neutronic

Penulis Korespondensi:

Email: pbazurah@gmail.com

ABSTRAK

Telah dilakukan simulasi pada *Molten Salt Fast Reactor* (MSFR) berdaya 100 MWth untuk menganalisis pengaruh bentuk dan ukuran teras terhadap kinerja neutronik. Penelitian ini menggunakan kode komputasi SRAC (*Standard Thermal Reactor Analysis Code System*) yang dikembangkan oleh JAEA (*Japan Atomic Energy Agency*). Analisis dilakukan terhadap 9 variasi ukuran dan rasio H/D (tinggi/diameter) teras pada teras MSFR silinder dua dimensi (2-D) dengan peninjauan terhadap parameter neutronik yaitu faktor multiplikasi efektif. Variasi ukuran teras dibagi menjadi model teras A, B dan C dengan volume masing-masing 2 m³, 4 m³ dan 6 m³. Masing-masing volume teras dibagi lagi menjadi tiga model teras berdasarkan rasio H/D yaitu model teras A1, B1 dan C1 dengan H>D, model teras A2, B2 dan C2 dengan H=D dan model teras A3, B3 dan C3 dengan H<D. Perhitungan neutronik dilakukan dengan mengatur komposisi bahan bakar dalam teras. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa seluruh variasi model teras menghasilkan nilai faktor multiplikasi efektif di atas 1 pada awal masa operasi reaktor. Model teras C1 merupakan model teras yang paling baik dalam mempertahankan kekritisan reaktor dengan *reactivity swing* sebesar 0,072163.

A simulation of 100 MWth Molten Salt Fast Reactor (MSFR) has been carried out to analyze the influence of core shape and size on its neutronic performance. This research used computational code SRAC (Standard Thermal Reactor Analysis Code System) developed by JAEA (Japan Atomic Energy Agency). Analysis has been done to 9 variations of core size and H/D (height/diameter) ratio on a two-dimensional (2-D) cylinder of MSFR in terms of a neutronic parameter such as the effective multiplication factor arrangement of the fuel composition. The size of the core was divided into A, B, and C models. Each model was divided into three models based on the H/D ratio, A1, B1, and C1 model have H>D, then A2, B2, and C2 model have H=D, and the last, A3, B3, and C3 model have H<D. The neutronic calculation shows that all core types bring out the value of effective multiplication factor above one at the beginning of the reactor operation. C1 is the most optimum core model because it can maintain the core reactor's criticality with a reactivity swing value of 0.072163.

Copyright © 2020 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Reaktor nuklir merupakan perangkat yang dapat mengontrol reaksi fisi berantai yang terjadi di dalamnya (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Energi nuklir yang dihasilkan dari sebuah reaktor fisi merupakan sumber energi yang menghasilkan energi listrik yang bersih tanpa emisi gas karbon. Kontribusi energi nuklir untuk pembangunan berkelanjutan tanpa efek gas rumah kaca dapat memenuhi kebutuhan energi dunia hingga lebih dari 50 tahun, terutama untuk negara-negara berkembang (Permana, 2020). Pada tahun 2017, setidaknya telah ada 454 pembangkit listrik tenaga nuklir yang tersebar di 31 negara dan mensuplai lebih dari 10% kebutuhan listrik dunia (Ho et al, 2019).

Perkembangan reaktor nuklir sejak tahun 1950 hingga saat ini telah sampai pada generasi IV (Locatelli et al, 2013). Salah satu jenis reaktor nuklir generasi IV adalah *Molten Salt Fast Reactor* (MSFR), yaitu reaktor nuklir dengan spektrum neutron cepat berbahan bakar cair, dimana bahan bakar terdispersi dalam larutan garam yang juga berfungsi sebagai bahan pendingin (Allibert et al, 2016). Salah satu keunggulan utama dari MSFR adalah sistem keamanan pasif pada desain terasnya. Teras reaktor dilengkapi dengan *emergency draining system* yang bisa digunakan sebagai sistem *shut down* terencana ataupun apabila terjadi potensi kecelakaan akibat meningkatnya temperatur di dalam teras (Rouch et al., 2014). MSFR juga memiliki manajemen limbah radioaktif yang mudah dan murah (Siemer, 2015). Dibandingkan dengan reaktor berbahan bakar padat, sistem MSFR membutuhkan persediaan fisil yang lebih rendah dan komposisi isotop bahan bakar yang homogen di dalam reaktor (Pioro, 2016).

Untuk menghasilkan desain reaktor dengan kinerja yang baik, perlu dilakukan beberapa tahapan analisis reaktor. Analisis neutronik merupakan analisis tahap awal yang meninjau beberapa parameter yang berhubungan dengan perilaku neutron di dalam teras reaktor, salah satunya adalah faktor multiplikasi efektif. Faktor multiplikasi efektif merupakan perbandingan jumlah neutron pada satu generasi dengan generasi sebelumnya yang dapat dipengaruhi oleh absorpsi maupun fisi neutron (Bell dan Glasstone, 1970). Kekritisitas teras reaktor dapat diketahui dengan melihat nilai faktor multiplikasi efektif reaktor tersebut (Duderstadt dan Hamilton, 1976). Kondisi teras reaktor yang ideal adalah kondisi teras yang dapat mempertahankan kekritisannya sepanjang masa operasi reaktor. Hal ini ditandai dengan nilai *reactivity swing* yang mendekati nol. Nilai *reactivity swing* merupakan selisih antara reaktivitas maksimum dan minimum pada reaktor (Wallenius, 2020).

Penelitian mengenai analisis neutronik pada MSFR telah dilakukan oleh Degtyarev (2015). Analisis neutronik dilakukan pada MSFR daya 3200 MW dengan siklus bahan bakar uranium-plutonium. Penelitian ini membuka jalan bagi pengembangan MSFR dengan siklus bahan bakar uranium-plutonium. Hu et al. (2017) telah melakukan analisis neutronik sekaligus termal-hidrolik pada suatu desain konseptual MSFR yang disebut MOSART (*Molten Salt Actinide Recycler and Transmuter*) berdaya 2400 MWth. Perkasa (2018) telah melakukan analisis neutronik MSFR berdaya termal 3000 MWth dengan variasi konfigurasi bahan bakar dan didapatkan hasil bahwa konfigurasi penggunaan bakar Th + U-233 memiliki koefisien multiplikasi efektif yang lebih konstan sepanjang masa operasi reaktor.

Pada penelitian ini, dilakukan analisis neutronik pada MSFR berdaya 100 MWth dengan bahan bakar Th + U-233. Optimasi desain dilakukan untuk melihat pengaruh ukuran teras dan rasio H/D (tinggi per diameter) terhadap parameter neutronik.

II. METODE

Penelitian mengenai analisis neutronik pada MSFR berdaya 100 MWth ini dilakukan menggunakan kode komputasi SRAC yang dikembangkan oleh JAEA (*Japan Atomic Energy Agency*) dan pustaka data nuklir dari JENDL-4.0. Spesifikasi reaktor ditunjukkan oleh Tabel 1.

Tabel 1 Spesifikasi reaktor (sumber: Merle-Lucotte, 2013)

Daya termal (MWth)	100
Temperatur rata-rata bahan bakar (°C)	725
Komposisi bahan bakar	75,5% LiF + 24,5% ThF ₄ - ²³³ UF ₄
Titik leleh bahan bakar (°C)	565
Densitas bahan bakar (gr/cm ³)	4,1

Variasi yang dilakukan pada penelitian ini adalah variasi ukuran atau volume teras dan variasi H/D (tinggi/diameter) untuk masing-masing volume teras tersebut. Variasi ukuran teras dan rasio H/D yang digunakan ditunjukkan oleh Tabel 2.

Tabel 2 Variasi ukuran dan rasio H/D teras reaktor

Volume teras (m ³)	Model ukuran teras	Jari-jari (m)	Tinggi (m)	H/D	Definisi	
2	A	1	0,631	1,6	1,3	<i>tall</i>
		2	0,674	1,4	1,0	<i>balance</i>
		3	0,728	1,2	0,8	<i>pancake</i>
4	B	1	0,779	2,1	1,3	<i>tall</i>
		2	0,866	1,7	1,0	<i>balance</i>
		3	0,922	1,5	0,8	<i>pancake</i>
6	C	1	0,892	2,4	1,3	<i>tall</i>
		2	0,977	2,0	1,0	<i>balance</i>
		3	1,030	1,8	0,8	<i>pancake</i>

2.1 Perancangan Input Program

Penelitian ini menggunakan modul PIJ berbentuk heksagonal dengan jari-jari 2 cm untuk menghitung sel bahan bakar nuklir hingga didapatkan nilai MACRO (tampang lintang makroskopik dari material yang telah dihomogenisasi) dan fluks yang akan digunakan pada CITATION (Okumura et al, 2007). Modul PIJ terdiri dari PIJ bahan bakar, PIJ *neutron absorber*, dan PIJ struktur eksternal. Perhitungan burnup dilakukan sepanjang masa operasi reaktor, yakni selama 2000 hari dan data burnup dilihat setiap 100 hari.

Di dalam struktur input PIJ dibutuhkan beberapa data penting yang dapat dihitung menggunakan rumus-rumus berikut:

1. Densitas Nuklida

$$N = \frac{w\rho N_{av}}{M} \quad (1)$$

keterangan:

- N : densitas nuklida
 w : tingkat pengayaan
 ρ : massa jenis elemen
 N_{av} : bilangan Avogadro
 M : massa atom dari elemen

2. Geometrical Buckling

$$B_g^2 = \left(\frac{\pi}{H}\right)^2 + \left(\frac{2,405}{R}\right)^2 \quad (2)$$

keterangan:

- H : tinggi teras reaktor
 R : jari-jari reaktor

3. Power Level

$$\text{Powerlevel} = \frac{P_{th}}{V_{teras}} \cdot A_{cell} \quad (3)$$

keterangan:

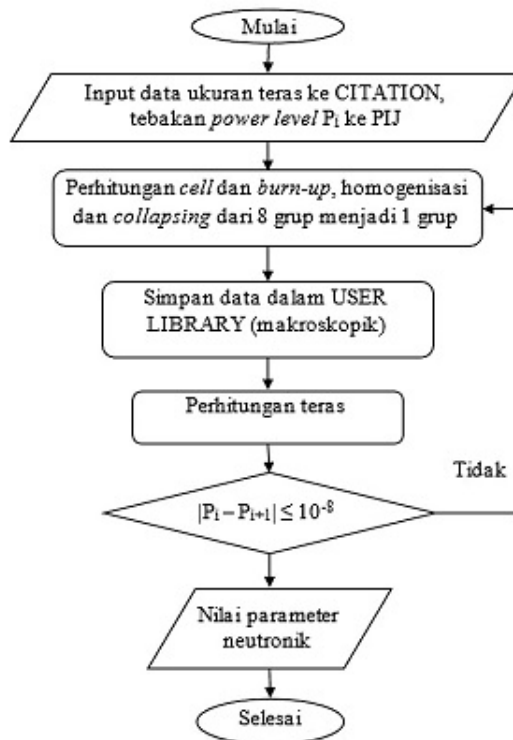
P_{th} : daya termal pada teras reaktor

V_{teras} : volume teras reaktor

A_{cell} : luas sel PIJ

2.2 Perhitungan parameter neutronik menggunakan SRAC

Perhitungan parameter neutronik menggunakan SRAC diawali dengan menyusun input pada modul PIJ dan CITATION. Input modul PIJ berisi informasi mengenai spesifikasi bahan bakar dan tebakan *power level*. Sedangkan input modul CITATION berisi informasi mengenai ukuran teras reaktor. Diagram alir perhitungan difusi multigrup pada SRAC ditunjukkan oleh Gambar 1.



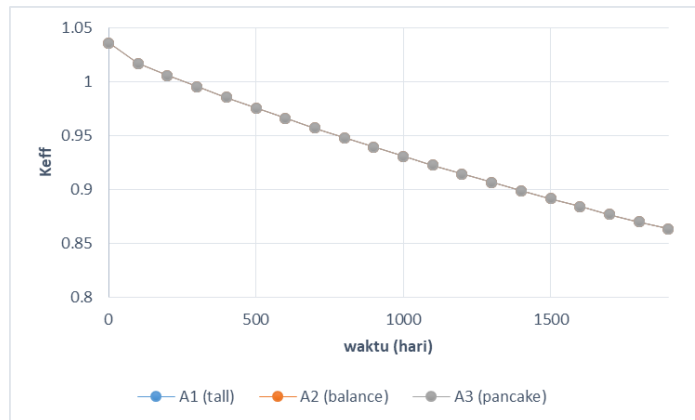
Gambar 1 Diagram alir perhitungan difusi

2.3 Perhitungan parameter neutronik menggunakan SRAC

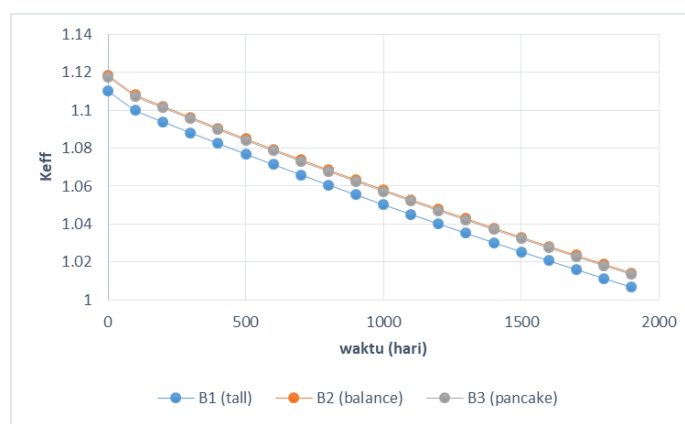
Data hasil perhitungan tersimpan dalam *XPS file*, kemudian data disalin ke *notepad/wordpad*. Setelah itu, data diplot dalam bentuk grafik menggunakan *microsoft excel*.

III. HASIL DAN DISKUSI

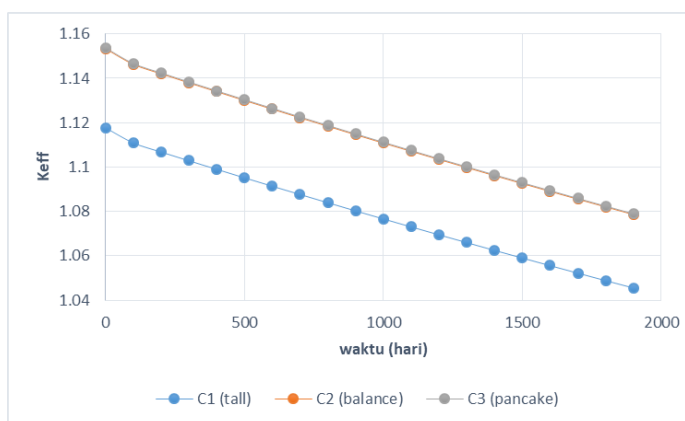
Berikut adalah grafik nilai faktor multiplikasi efektif pada *Molten Salt Fast Reactor* berdaya termal 100 MWth untuk 9 variasi ukuran teras dan rasio H/D reaktor yang diamati selama 2000 hari. Komposisi bahan bakar yang digunakan pada semua model teras adalah sama, yakni 75,5% LiF + 24,5% $^{232}\text{ThF}_4$ - $^{233}\text{UF}_4$. Pengaturan komposisi bahan bakar bertujuan untuk menghasilkan kondisi awal reaktor yang kritis.



Gambar 2 Faktor multiplikasi efektif pada model teras A



Gambar 3 Faktor multiplikasi efektif pada model teras B



Gambar 4 Faktor multiplikasi efektif pada model teras C

Berdasarkan data yang terdapat pada Gambar 2 hingga Gambar 4, nilai faktor multiplikasi efektif setiap model teras berada di atas 1 pada *step burn-up* pertama, kemudian menurun secara signifikan seiring berjalannya masa operasi reaktor. Berdasarkan ketiga grafik faktor multiplikasi efektif dengan volume teras yang berbeda tersebut, reaktor cenderung memiliki nilai faktor multiplikasi efektif yang lebih besar apabila volume teras diperbesar. Sedangkan untuk volume teras yang sama, model teras dengan tipe *tall* menghasilkan nilai faktor multiplikasi yang paling kecil dibandingkan dengan model teras *balance* atau *pancake*.

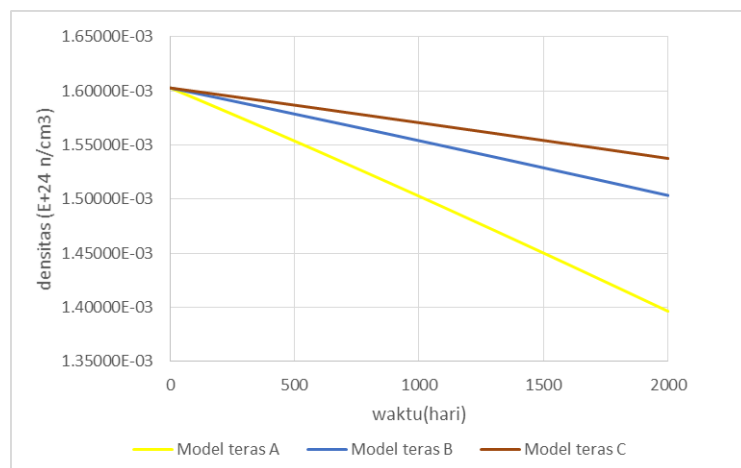
Kemampuan setiap model teras dalam mempertahankan kekritisan teras diperlihatkan oleh nilai *reactivity swing* pada Tabel 3.

Tabel 3 *Reactivity swing*

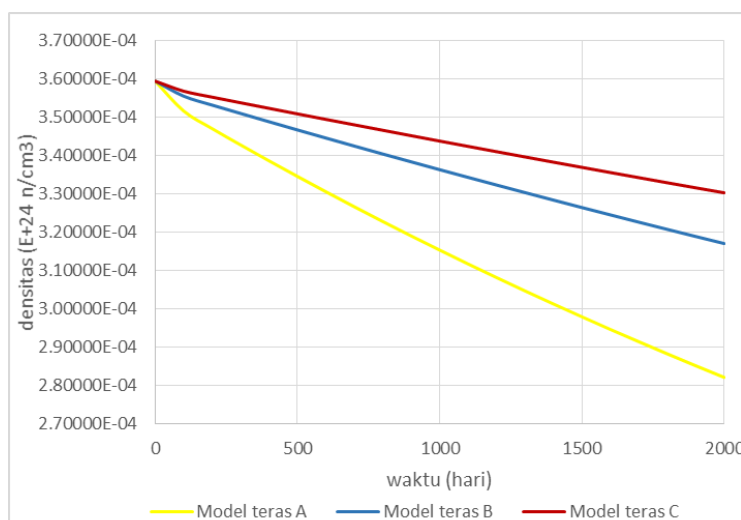
Model teras	<i>Reactivity swing</i>
A1	0,172882
A2	0,172882
A3	0,172882
B1	0,103508
B2	0,104355
B3	0,104272
C1	0,072163
C2	0,074691
C3	0,074717

Nilai *reactivity swing* yang paling rendah dihasilkan oleh volume teras yang paling besar (berdasarkan variasi ukuran teras) dan tipe teras *tall* (berdasarkan variasi rasio H/D). Nilai *reactivity swing* yang paling rendah menunjukkan kondisi teras yang paling stabil karena mampu mempertahankan kekritisan teras di sepanjang masa operasi dengan lebih baik. Dari seluruh model teras, model teras C1 menghasilkan kondisi teras yang paling stabil sepanjang masa operasi reaktor dengan nilai *reactivity swing* yang paling rendah, yaitu 0,072163.

Penurunan nilai faktor multiplikasi efektif sepanjang masa operasi reaktor dapat terjadi akibat berkurangnya nuklida-nuklida bahan bakar akibat pembakaran. Hal ini dapat dijelaskan dengan melihat komposisi nuklida-nuklida penting dalam bahan bakar seperti uranium dan plutonium.



Gambar 5 Densitas nuklida Th-232 dalam bahan bakar



Gambar 6 Densitas nuklida U-233 dalam bahan bakar

Pada Gambar 5 dan Gambar 6 dapat dilihat bahwa terjadi penurunan densitas nuklida thorium-232 dan uranium-233 akibat pembakaran bahan bakar. Uranium-233 merupakan material fisil utama dalam bahan bakar ini, sehingga reaktivitas reaktor dipengaruhi oleh jumlah uranium-233 yang ada dalam bahan bakar. Model teras A memiliki penurunan densitas yang lebih tajam dibandingkan model teras lainnya. Semakin besar volume teras yang digunakan maka semakin kecil pula penurunan densitas dari thorium-232 dan uranium-233 dalam bahan bakar.

IV. KESIMPULAN

Seluruh model teras memiliki nilai faktor multiplikasi efektif di atas 1,0 pada awal masa operasi reaktor. Faktor multiplikasi efektif akan semakin meningkat apabila volume teras diperbesar dan bentuk reaktor dibuat menjadi lebih pipih (tipe *tall*). Model teras C dengan tipe teras *tall* (C1) merupakan model teras yang paling optimum dalam mempertahankan kekritisan teras reaktor dengan nilai *reactivity swing* paling rendah yaitu 0,072163.

DAFTAR PUSTAKA

- Allibert, M., Aufiero, M., Brovchenko, M., Delpéch, S., Ghetta, V., Heuer, D., Laureau, A., Merle-Lucotte, E., 2016, *Handbook of Generation IV Nuclear Reactors*, Elsevier, hal.157-188.
- Bell, G. I., Glasstone, S., 1970, *Nuclear Reactor Theory*, Van Nostrand Reinhold Company, New York.
- Degtyarev, A., Myasnikov, A., Ponomarev, L., 2015, *Molten Salt Fast Reactor with U-Pu Cycle*, *Progress in Nuclear Energy*, Vol.82, Elsevier, hal. 33-36.
- Duderstadt, J.J. dan Hamilton, L.J., 1976, *Nuclear Reactor Analysis*, John Wiley & Sons, Inc., Kanada.
- Ho, M., Obbard, E., Burr, P. A., Yeoh, G., 2019, A Review on The Development of Nuclear Power Reactor, *Energy Procedia*, Vol.160, Elsevier, hal. 459–466.
- Hu, T., Cao, L., Wu, H., Du, X., He, M., 2017, Coupled neutronics and thermal-hydraulics simulation of molten salt reactors based on OpenMC/TANSY, *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 109, Elsevier, hal. 260-276.
- Locatelli, G., Mancini, M., Todeschini, N., 2013, *Generation IV Nuclear Reactors : Current status and future prospects*, Elsevier, hal. 1503-1520.
- Merle-Lucotte, E., Heuer, D., Allibert, M., Brovchenko, M., Ghetta, V., Rubiolo, P., Laureau, A., 2013, Recommendations for a Demonstrator of Molten Salt Fast Reactor, *Proceedings of International Conference on Fast Reactor and Related Fuel Cycle: Safe Technologies and Sustainable Scenarios (FR13)*, Paris.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., Tsuchihashi, K., 2007, SRAC2006: A Comprehensive Neutronic Calculation Code System, Japan Atomic Energy Agency, Japan.
- Perkasa, D., 2018, Analisis Neutronik Molten Salt Fast Reactor, *Skripsi*, Institut Teknologi Bandung, Bandung.
- Permana, S., 2020, Basic design parameter optimization on water cooled thorium breeder reactor, *Annals of Nuclear Energy*, Vol.139, Elsevier, hal. 1-8.
- Pirotto, I. L., 2016, Introduction: Generation IV International Forum from Handbook of Generation IV Nuclear Reactors, *Woodhead Publishing Series in Energy*, hal.37-54.
- Rouch, H., Geoffroy, O., Rubiolo, P., Laureau, A., Brovchenko, M., Heuer, D., Merle-lucotte, E., 2014, Preliminary thermal – hydraulic core design of the Molten Salt Fast Reactor (MSFR), *Annals of Nuclear Energy*, Vol.64, Elsevier, hal. 449–456.
- Siemer, D. D., 2015, Why the molten salt fast reactor (MSFR) is the “ best ” Gen IV reactor, *Energy Science and Engineering*, Vol.4, the Society of Chemical Industry and John Wiley & Sons Ltd., hal. 83–97.
- Wallenius, J., 2020, Anomalous reactivity swing in the ^{238}U - ^{233}U system, *Annals of Nuclear Energy*, Vol.139, Elsevier, hal.1-6.