

KOMPARASI HASIL PERHITUNGAN INVENTORI HASIL FISI TERAS PLTN PWR 1000 MWE ANTARA ORIGEN2.1 DENGAN ORIGEN-ARP

Anis Rohanda, Rokhmadi
Pusat Teknologi Reaktor dan Keselamatan Nuklir

ABSTRAK

KOMPARASI HASIL PERHITUNGAN INVENTORI HASIL FISI TERAS PLTN PWR 1000 MWe ANTARA ORIGEN2.1 DENGAN ORIGEN-ARP. Reaksi pembelahan (fisi) menghasilkan sejumlah nuklida hasil fisi yang terkumpul pada teras reaktor. Kumpulan dari unsur-unsur hasil fisi, atau disebut sebagai 'inventori' hasil fisi mempunyai beberapa karakteristik yang sangat penting untuk diketahui seperti : konsentrasi (massa), aktivitas, jenis inventori, dan daya termal. Untuk itu perlu dilakukan perhitungan inventori hasil fisi pada teras reaktor. Perhitungan inventori hasil fisi dapat dilakukan dengan menggunakan kode komputer (*computer code*) seperti ORIGEN2.1 dan ORIGEN-ARP. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui komparasi atau perbandingan hasil analisis antara ORIGEN2.1 dengan ORIGEN-ARP dalam hal karakteristik massa (gram), radioaktivitas (Curie), dan daya termal (Watt). Hasil penelitian ini juga bermanfaat untuk memperkaya wawasan dan pengetahuan tentang cara menganalisis inventori hasil fisi yang terbentuk dalam teras reaktor daya. Perhitungan ini dilakukan pada basis reaktor daya PLTN tipe PWR kelas 1000 MWe setelah satu siklus operasi. Hasil analisis dengan *code* ORIGEN-ARP menunjukkan bahwa jumlah nuklida inventori yang dihasilkan lebih banyak daripada hasil analisis dengan *code* ORIGEN2.1. Perbedaan hasil keluaran ORIGEN-ARP dengan ORIGEN2.1 terutama pada hasil keluaran massa produk fisi, radioaktivitas inventori dan daya termal. Untuk kategori massa produk fisi, perbedaan terhadap hasil keluaran ORIGEN2.1 mulai dari yang terkecil adalah 0,06% (Sm-150) dan terbesar 48,43% (Sm-148) dan tidak ada perbedaan signifikan untuk massa produk aktivasi. Untuk hasil radioaktivitas, perbedaannya mulai dari 2,94 % (unsur Strontium, Sr) hingga 407,73% (unsur Palladium, Pd). Sedangkan untuk hasil daya termal, perbedaannya mulai dari 1,49 % (unsur Barium, Ba) hingga 114,42% (unsur Palladium, Pd).

Kata Kunci : Inventori, PWR, ORIGEN2.1, ORIGEN-ARP

ABSTRACT

COMPARISON OF INVENTORY CALCULATION RESULTS OF PWR 1000 MWe NPP BETWEEN ORIGEN2.1 AND ORIGEN-ARP COMPUTER CODE. Fission reaction produces a number of fission fragment which are accumulated in the reactor core. The accumulation of fission fragments, or called by 'inventory' has several characteristics that are very important to know, such as : concentration (mass), activity, types, and thermal power. Hence, it is need to perform fission inventory calculation in the reactor core. Fission inventory calculations can be performed using ORIGEN2.1 and ORIGEN-ARP computer code. This study has the objective to determine the comparison analysis between ORIGEN2.1 with ORIGEN - ARP in terms of the characteristics of the mass (g), radioactivity (Curie), and thermal power (Watts). The results are also useful to enhance fission inventory analysis knowledgement in the power reactor. The calculation were performed on the basis of PWR 1000 MWe nuclear power reactor after one periode operating cycle. Analytical results using ORIGEN-ARP code indicates that the number of nuclide inventory produced more than anaysis results using ORIGEN2.1 code. The deviation between ORIGEN-ARP and ORIGEN2.1 output especially in the fission product mass, radioactivity inventory and thermal power. In the fission product mass category, the smallest deviation is 0.06 % (Sm - 150) and the largest is 48.43 % (Sm - 148) and there was no significant difference in mass activation products. For radioactivity results, the deviation ranging from 2.94 % (Strontium) to 407.73 % (Palladium). Furthermore, for thermal power results, the deviation ranging from 1.49 % (Barium) to 114.42 % (Palladium).

Keywords : Inventory, PWR, ORIGEN2.1, ORIGEN-ARP

PENDAHULUAN

Terjadinya reaksi fisi atau reaksi pembelahan pada teras reaktor nuklir menyebabkan terbentuknya unsur-unsur radioaktif hasil fisi dalam bentuk produk fisi (*fission product*), aktinida & anak luruhnya (*actinide & daughters*) dan juga hasil aktivasi (*activation product*). Unsur-unsur radioaktif hasil fisi tersebut akan terus terbentuk selama pengoperasian reaktor nuklir dan terakumulasi pada perangkat bahan bakar nuklir⁽¹⁾. Kumpulan dari unsur-unsur hasil fisi, atau lazim disebut sebagai ‘inventori’ hasil fisi memiliki beberapa karakteristik material inti atom yang penting untuk diketahui seperti konsentrasi atau massa, aktivitas, daya termal, dan lain sebagainya.

Perhitungan inventori hasil fisi yang didasarkan pada perhitungan gayut waktu (*time-dependent*) dapat ditentukan dengan kode komputer (*computer code*) ORIGEN2.1⁽²⁾. ORIGEN2.1 telah digunakan secara luas sejak tahun 1991 untuk menghitung inventori hasil fisi pada teras reaktor. Dewasa ini telah dikembangkan kode komputer sejenis yaitu ORIGEN-Automatic Rapid Processing atau dikenal dengan sebutan ORIGEN-ARP. ORIGEN-ARP terdapat dalam paket program (modul) SCALE5.1 bersama-sama dengan program yang lain seperti : GeeWiz, Keno3d, dan SAS4⁽³⁾. ORIGEN2 hanya menerapkan

library (pustaka) tampang lintang 1 grup depleksi dan peluruhan tanpa adanya modifikasi pustaka lebih lanjut untuk tiap kasus yang dihadapi. Oleh sebab itu, pada kasus dimensi dan pengkayaan perangkat bahan bakar yang tidak sama dengan pustaka yang ada, ORIGEN2.1 seringkali memberikan hasil yang kurang optimal. Kendala seperti ini diharapkan dapat diatasi dengan penggunaan ORIGEN-ARP. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan perbandingan kuantitatif hasil analisis antara ORIGEN2.1 dengan ORIGEN-ARP dalam hal karakteristik massa (gram), radioaktivitas (Curie), dan daya termal (Watt) dari inventori hasil fisi yang dihasilkan dalam teras reaktor daya jenis air tekan (PWR) kelas 1000 MWe setelah 1× siklus operasi. Sedangkan tinjauan kualitatif tentang zat radioaktif sebagai suku sumber yang terlepas dari reaktor daya PWR telah dilakukan oleh Suharno pada tahun 2007⁽⁴⁾. Hasil penelitian ini juga bermanfaat untuk memperluas pengetahuan dan wawasan tentang cara menganalisis inventori hasil fisi yang terbentuk dalam teras reaktor daya.

DASAR TEORI

Perhitungan inventori hasil fisi didasarkan pada basis 1 kelompok depleksi dan peluruhan radioaktif. Persamaan umumnya diformulasikan sebagai berikut⁽⁵⁾:

$$\frac{dX_i}{dt} = \sum_{j=1}^N l_{i,j} \lambda_j X_j - \varphi \cdot \sum_{k=1}^N f_{i,k} \sigma_k X_k - (\lambda_i + \varphi \sigma_i + r_i) \cdot X_i + F_i \quad ; \quad i=1,2,\dots,N \quad (1)$$

dengan :

X_i : rapat atom dari nuklida I
 N : jumlah nuklida

l_{ij} : fraksi peluruhan radioaktif oleh nuklida lain j yang menuju formasi spesies i

- λ_i : konstanta peluruhan radioaktif.
 Φ : fluks neutron rerata posisi dan energi
 f_{ik} : fraksi serapan neutron oleh nuklida lain yang menuju formasi spesies i .
 σ_k : tampang lintang serapan neutron nuklida k pada spektrum rerata.
 r_i : laju perpindahan kontinu nuklida i dari system.
 F_i : laju umpan kontinu dari nuklida i .

Persamaan di atas sebagai dasar untuk mengembangkan kode komputer penghitung inventori hasil fisi seperti ORIGEN2.1 dan ORIGEN-ARP yang mampu menentukan proses penumpukan, proses dan peluruhan material radioaktif.

ORIGEN2.1 (Oak Ridge Isotope GENERation and depletion code version 2.1)

ORIGEN2.1 merupakan kode komputer dengan basis 1 kelompok depleksi dan peluruhan radioaktif yang dikembangkan oleh divisi Teknologi Kimia di *Oak Ridge National Laboratory* (ORNL). Secara prinsip, ORIGEN2.1 digunakan untuk menghitung komposisi radio nuklida dan parameter lain yang terkait dengan material inti atom, termasuk didalamnya karakterisasi dari bahan bakar bekas (*spent fuel*), limbah radioaktif, deposit dan pabrikasi uranium, aliran gas mulia (*noble gases*) dan juga unsur-unsur hasil pembakaran yang dapat digunakan kembali (*recovered elements*) seperti uranium dan plutonium⁽⁵⁾.

Tampang lintang, kelimpahan produk fisi, data peluruhan, data peluruhan foton tersedia dalam bentuk *library data* selama program ini dijalankan. ORIGEN2.1 memiliki skema data

masukan (*input*) yang fleksibel yang mempermudah pengguna untuk menghitung fraksi bakar (*burn-up*) dan inventori produk fisi dalam memberikan informasi daya reaktor dan siklus operasi seperti daya peluruhan reaktor setelah reaktor mengalami scram. Sebagian data spesifik masukan yang diperlukan adalah daya dari berbagai bentuk Elemen Bahan Nuklir (EBN), fraksi bakar dan data mengenai komposisi U-235 dan U-238 mula-mula. Untuk mempermudah dalam analisis inventori produk fisi, penumpukan produk fisi dari tiap bentuk EBN harus dihitung berdasarkan waktu tinggal dalam reaktor (lama pembakaran EBN) dan fraksi bakarnya. Inventori total produk fisi merupakan jumlahan dari inventori produk fisi elemen penyusunnya. Inventori produk fisi pada ruang antara BBN dan kelongsong dan inventori lepasannya pada suhu tinggi dapat ditentukan dengan mengatur parameter data masukan dari pengguna yang bersesuaian dengan konstanta laju pelepasan (*release rate constant*).

ORIGEN-ARP (ORIGEN - Automatic Rapid Processing)

ORIGEN-ARP merupakan suatu program komputer yang terdapat dalam modul SCALE5.1 yang dapat digunakan untuk menghitung dan menganalisis inventori hasil fisi, peluruhan dan depleksi bahan bakar bekas dengan menggunakan tampang lintang menurut kasus yang telah disediakan (*problem-dependent cross sections*)⁽³⁾. Pustaka tampang lintang tersebut dibagikan dengan modul ARP dengan algoritma interpolasi untuk rentang *properties* bahan bakar dan kondisi operasi tertentu. Interpolasi dari

tampang lintang bahan bakar berbasis Uranium dimungkinkan dapat dilakukan pada tingkat fraksi bakar, pengkayaan dan densitas air yang bervariasi. *Code* ini dibangun dengan bahasa C++ yang menerapkan sistem komputasi kompleks yang mengkaitkan (*couple*) antara perhitungan *transport* fisika reaktor dengan fraksi bakar sehingga mampu menyelesaikan problem transmudasi neutron dan persamaan peluruhan sehingga terdefinikan konsentrasi nuklida gayut waktu. ORIGEN-ARP mampu memfasilitasi *file* data masukan yang dipersiapkan pengguna dengan tampilan grafis berbasis *windows* berupa *toolbars*, *forms*, bantuan *online* dan gambar (*plotting*) yang interaktif.

METODOLOGI

Penelitian ini dilakukan dalam 2 tahapan utama sebagai berikut :

1. *Penyiapan data masukan (input) ORIGEN2.1 dan ORIGEN-ARP*

Data masukan yang diperlukan adalah data massa unsur penyusun teras homogen dan data

siklus operasi PLTN tipe PWR 1000 MWe yang berbasis pada AP1000 Westinghouse⁽⁶⁾. Data massa unsur penyusun teras homogen meliputi massa total perangkat bahan bakar termasuk kelongsong (*cladding*) dan massa air pendingin yang digunakan. Disamping data-data tersebut, ORIGEN-ARP masih memerlukan data masukan yang lain, seperti jenis perangkat bahan bakar dan grup energi gamma yang digunakan. Keseluruhan data masukan ini ditabulasikan dalam Tabel 1.

2. *Analisis & komparasi hasil massa, radioaktivitas dan daya termal.*

Setelah input dipersiapkan dengan benar maka aplikasi ORIGEN2.1 dan ORIGEN-ARP dijalankan hingga diperoleh file data keluaran (*output*) berekstensi '*.out' dari masing-masing code tersebut. Data keluaran yang akan dianalisis meliputi massa (Gram), radioaktivitas (Curie) dan daya termal (Watt). Baik pada hasil keluaran ORIGEN2.1 maupun ORIGEN-ARP, parameter-parameter tersebut terdapat pada bagian 'CONCENTRATIONS GRAMS)',

Tabel 1. Data masukan ORIGEN2.1 dan ORIGEN-ARP⁽⁶⁾

No	Data masukan	Keterangan			
1.	Komposisi teras homogen	1. Uranium (U) a. U-235 b. U-238 2. Hidrogen (H) 3. Carbon (C) 4. Nitrogen (N) 5. Oksigen (O)	2.870.696 g 81.727.942 g 1.469.858 g 2.635 g 898 g 23.063.945 g	6. Silikon (Si) 7. Besi (Fe) 8. Zirkonium (Zr) 9. Niobium (Nb) 10. Timah (Sn) 11. Hafnium (Hf)	976 g 21.474 g 19.089.178 g 191.316 g 193.268 g 781 g
2.	Jenis perangkat bahan bakar	w17 × 17			
3.	Grup energi gamma	18 Grup ORIGEN			
4.	Siklus operasi	~ 18 bulan operasi dan 17 hari padam			

‘RADIOACTIVITY (CURIES)’ dan ‘THERMAL POWER (WATTS)’. Hasil keluaran ini kemudian diolah dan dianalisis dengan menggunakan MS. Office Excel. Analisis meliputi komparasi hasil antara kedua *code* tersebut termasuk persentase perbedaan data analisis ORIGEN-ARP terhadap data analisis ORIGEN2.1 yang disajikan dalam bentuk persentase angka ataupun diagram batang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan inventori hasil fisi teras PLTN PWR 1000 MWe dilakukan dengan menggunakan *code* ORIGEN2.1 dan ORIGEN-ARP. Hasil fisi pada perhitungan ORIGEN2.1 terbagi dalam 3 kategori : Produk Aktivasi (*Activation Products*), Aktinida dan Anak Luruhnya (*Actinides & Daughters*), dan Produk Fisi (*Fission Products*), sedangkan pada ORIGEN-ARP disebutkan dengan nama : *Light Elements*, *Actinides* dan *Fission Products*. Komparasi hasil perhitungan antara kedua *code* tersebut diamati dari segi massa atau *concentration* (gram), radioaktivitas atau *radioactivity* (Curie) dan daya termal atau *thermal power* (Watt) pada akhir 1 siklus operasi reaktor daya 1000 MWe. Dari hasil komparasi tersebut yang ditunjukkan dalam Tabel 2, diperoleh informasi bahwa jumlah nuklida inventori terhitung dengan menggunakan ORIGEN-ARP lebih banyak daripada ORIGEN2.1. Jumlah nuklida inventori total yang terhitung dengan ORIGEN-ARP adalah 109 nuklida sedangkan ORIGEN2.1

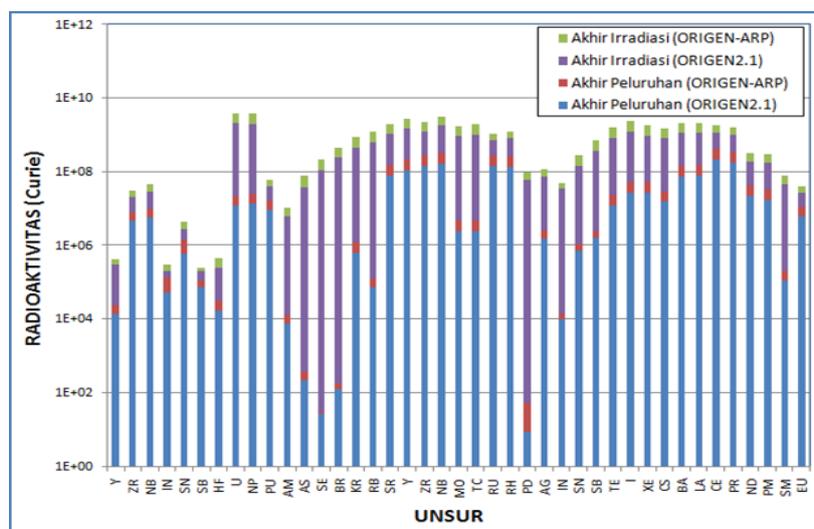
adalah 98 nuklida. Perbedaan tersebut terutama disebabkan perbedaan jumlah produk fisi (*fission products*) yang cukup mencolok. Pada ORIGEN-ARP dihasilkan 87 nuklida produk fisi sedangkan pada ORIGEN2.1 hanya dihasilkan 80 nuklida. Hasil komparasi persentase perbedaan massa ORIGEN-ARP terhadap ORIGEN2.1 pada saat reaktor beroperasi dan padam ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2 menunjukkan bahwa secara umum, perbedaan massa inventori hasil fisi untuk kategori produk aktivasi ORIGEN-ARP terhadap ORIGEN2.1 sangat kecil atau bisa dikatakan tidak ada perbedaan yang signifikan. Hal ini mengindikasikan library tampang lintang reaksi untuk kategori produk aktivasi pada ORIGEN-ARP sama dengan ORIGEN2.1. Perbedaan kecil lainnya yaitu ORIGEN-ARP masih mendeteksi sejumlah massa Sn-116, sedangkan ORIGEN2.1 tidak. Hal yang berbeda ditunjukkan untuk kategori Aktinida dan Produk Fisi. Pada kategori aktinida secara umum perbedaannya kurang dari 20% dengan penyimpangan terkecil 0,26%. Sedangkan untuk kategori produk fisi, perbedaannya bervariasi, yang terkecil adalah 0,06% (Sm-150) dan terbesar 48,43% (Sm-148).

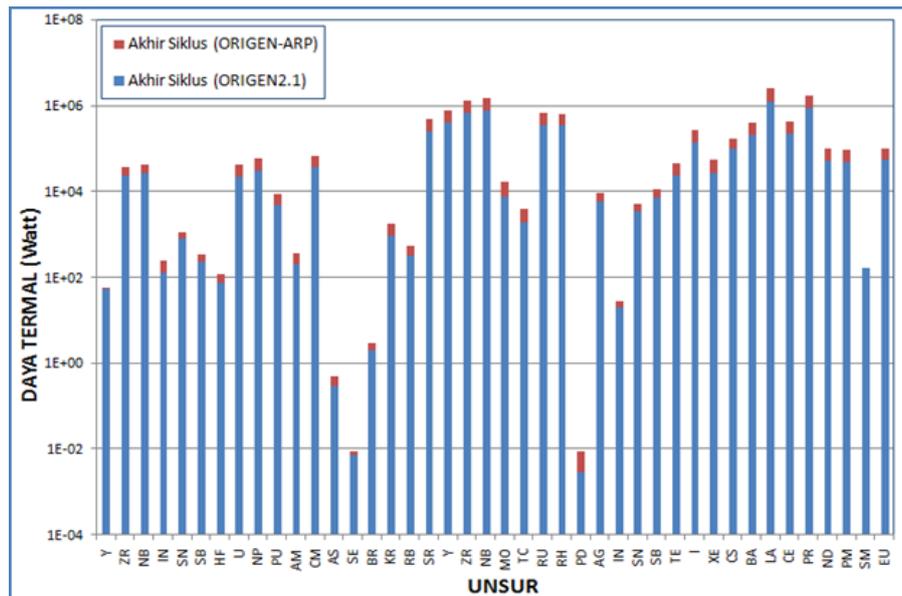
Komparasi lainnya adalah pada radioaktivitas (Curie) dan daya termal (Watt). Perbedaan hasil radioaktivitas dan daya termal terhitung dengan menggunakan ORIGEN-ARP bila dibandingkan dengan ORIGEN2.1 ditunjukkan secara berurutan pada Gambar 1 dan Gambar 2.

Tabel 2. Hasil komparasi persentase perbedaan massa inventori hasil fisi antara ORIGEN-ARP dengan ORIGEN2.1

KATEGORI No.	ORIGEN-ARP	ORIGEN2.1	PERBEDAAN MASSA (%)	
			REAKTOR OPERASI (18 bulan)	REAKTOR PADAM (17 hari)
A.	<i>Light elements</i>	<i>Activation Products</i>		
1	h-1	H-1	0,00	0,00
2	o-16	O-16	0,00	0,00
3	o-16	O-18	0,00	0,00
4	Zr-90	ZR-90	0,03	0,03
5	Zr-91	ZR-91	0,00	0,00
6	Zr-92	ZR-92	-0,06	-0,06
7	Zr-94	ZR-94	0,00	0,00
8	Zr-96	ZR-96	0,04	0,04
9	Nb-93	NB-93	0,32	0,32
10	Sn-116	-	-	-
11	Sn-118	SN-118	0,32	0,32
12	Sn-120	SN-120	0,02	0,02
B.	<i>Actinides</i>	<i>Actinides & Daughters</i>		
1	u-235	U-235	10,92	10,92
2	u-236	U-236	-7,31	-7,31
3	u-238	U-238	0,26	0,26
4	Np-237	-	-	-
5	Pu-238	-	-	-
6	Pu-239	PU-239	-5,59	-5,64
7	Pu-240	PU-240	-19,40	-19,40
8	Pu-241	PU-241	-16,87	-16,87
9	Pu-242	PU-242	-	-
10	Am-243	-	-	-
C.	<i>Fission Products</i> 87 nuklida	<i>Fission Products</i> 80 nuklida		
TOTAL	109 nuklida	98 nuklida		



Gambar 1. Perbedaan hasil keluaran radioaktivitas (Curie) ORIGEN-ARP dengan ORIGEN2.1



Gambar 2. Perbedaan hasil keluaran daya termal (Watt) ORIGEN-ARP dengan ORIGEN2.1

Baik Gambar 1 maupun Gambar 2 menunjukkan terjadinya perbedaan hasil yang bervariasi. Secara umum, nilai radioaktivitas yang dihasilkan ORIGEN-ARP lebih besar daripada ORIGEN2.1, baik pada saat akhir operasi (irradiasi) maupun akhir pemadaman. Untuk hasil radioaktivitas pada kasus akhir pemadaman misalnya, perbedaan terhadap radioaktivitas ORIGEN2.1 mulai dari 2,94 % (unsur Strontium, Sr) sedangkan pada akhir irradiasi 2,40%. Perbedaan tertinggi hingga 407,73% didapati pada unsur Palladium (Pd) pada akhir pemadaman dan 44,14% pada akhir irradiasi. Perbedaan hasil pada nilai radioaktivitas nuklida diduga disebabkan oleh perbedaan *library* tampang lintang dan konstanta peluruhan ORIGEN-ARP dan ORIGEN2.1. Hal ini dapat dilihat dari jumlah nuklida produk fisi yang dihasilkan. ORIGEN-ARP mulai diperkenalkan pada tahun 2006 sedangkan

ORIGEN2.1 telah digunakan sejak tahun 1980, sehingga dapat dikatakan *library* yang digunakan pada ORIGEN-ARP lebih terbaru (*update*) daripada ORIGEN2.1⁽³⁾. Berdasarkan Persamaan 1, nilai radioaktivitas saat reaktor beroperasi dipengaruhi oleh tampang lintang reaksi fisi, sedangkan saat reaktor padam dipengaruhi oleh konstanta peluruhan. Hal yang serupa juga berlaku pada hasil daya termal di akhir siklus dengan perbedaannya mulai dari 1,49 % (unsur Barium, Ba) hingga 114,42% (unsur Palladium, Pd). Berdasarkan teorema yang ada, daya termal sangat ditentukan oleh fluks termal, tampang lintang makroskopis reaksi fisi dan volume teras⁽⁷⁾. Pada kasus ini, yang sangat berperan adalah tampang lintang makroskopis reaksi fisi. Sedangkan nilai fluks termal yang dihasilkan selama operasi reaktor (pembakaran BBN) dan volume teras bernilai tetap untuk tiap siklus operasi reaktor.

KESIMPULAN

Dari hasil dan pembahasan dapat disimpulkan sebagai berikut :

1. Hasil analisis dengan *code* ORIGEN-ARP menunjukkan bahwa jumlah nuklida inventori yang dihasilkan dalam teras PLTN PWR 1000 MWe untuk 1x siklus operasi lebih banyak daripada hasil analisis dengan *code* ORIGEN2.1.
2. Tidak ada perbedaan signifikan pada massa inventori hasil fisi yang dihasilkan untuk kategori produk aktivasi antara ORIGEN-ARP dengan ORIGEN2.1.
3. Perbedaan hasil keluaran ORIGEN-ARP dengan ORIGEN2.1 terutama pada radioaktivitas inventori dan daya termal.
4. Dengan dukungan *library* yang lebih baru, ORIGEN-ARP lebih direkomendasikan untuk digunakan pada perhitungan inventori hasil fisi di teras reaktor daya daripada ORIGEN2.1.

DAFTAR PUSTAKA

1. Kelber, C., *The Radiological Source Term of Nuclear Power Reactors*, Nuclear Safety, Volume 27, No. 1, January-March, 1986.
2. RSIC, *ORIGEN 2.1 Isotope Generation and Depletion Code – Matrix Exponential Method*, Computer Code Collection CCC-371, August 1, 1991.
3. Gauld, I.C., Bowman, S.M., Horwedel, J.E., *ORIGEN-ARP: Automatic Rapid Processing for Spent Fuel Depletion, Decay and Source Term Analysis*, ORNL/TM-2005/39, Revision 5.1, Vol. I, Book 2, Sect. D1, November, 2006.
4. Suharno, *Zat Radioaktif sebagai Suku Sumber yang Terlepas dari Reaktor Daya PWR*, Sigma Epsilon, Vol. 11, No. 1, Hal. 9-14 Februari, 2007.
5. Croff, A.G., *ORIGEN2: a Versatile Computer Code for Calculating The Nuclide Compositions and Characteristic of Nuclear Material*, Nuclear Technology, Vol. 62, September, 1983.
6. US-NRC, *Advanced Passive 1000 Design Control Document*, Westinghouse Electric Company LLC, January 27, 2006. Tersedia di www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/ap1000.html. Diakses: 5 Juni 2012
7. TPUB, *Nuclear Physics and Reactor Theory - Module 2 : Reactor Theory (Neutron Characteristics)*, Department of Energy Fundamentals Handbook, P.g. 21, Integrated Publishing. Tersedia di http://nuclearpowertraining.tpub.com/h1019v1/css/1019v1_125.htm. Diakses: 10 Januari 2013.