



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Profesor Abdul Waris, Ph.D.

**PENGELOLAAN BAHAN BAKAR DAN
LIMBAH NUKLIR: MENUJU *ZERO RELEASE*
*NUCLEAR WASTE***

24 Maret 2017
Balai Pertemuan Ilmiah ITB

**Orasi Ilmiah Guru Besar
Institut Teknologi Bandung**
24 Maret 2017

Profesor Abdul Waris, Ph.D.

**PENGELOLAAN BAHAN BAKAR DAN
LIMBAH NUKLIR: MENUJU *ZERO RELEASE*
*NUCLEAR WASTE***



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

Hak cipta ada pada penulis

Judul: PENGELOLAAN BAHAN BAKAR DAN LIMBAH NUKLIR:
MENUJU *ZERO RELEASE NUCLEAR WASTE*
Disampaikan pada sidang terbuka Forum Guru Besar ITB,
tanggal 24 Maret 2017.

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penulis.

UNDANG-UNDANG NOMOR 19 TAHUN 2002 TENTANG HAK CIPTA

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama **7 (tujuh) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)**.
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau Hak Terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama **5 (lima) tahun** dan/atau denda paling banyak **Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)**.

Hak Cipta ada pada penulis
Data katalog dalam terbitan

Abdul Waris

PENGELOLAAN BAHAN BAKAR DAN LIMBAH NUKLIR:
MENUJU *ZERO RELEASE NUCLEAR WASTE*
Disunting oleh Abdul Waris

Bandung: Forum Guru Besar ITB, 2017
vi+56 h., 17,5 x 25 cm

ISBN 978-602-6624-01-7

1. Fisika Nuklir dan Biofisika 1. Abdul Waris

KATA PENGANTAR

Segala puji dan rasa syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, karena atas berkat Rahmat dan RidhoNya, penulis dapat menyelesaikan naskah orasi ilmiah ini. Penghargaan dan rasa hormat serta terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung yang telah memberikan kesempatan untuk menyampaikan orasi ilmiah dengan judul **Pengelolaan Bahan Bakar dan Limbah Nuklir: Menuju Zero Release Nuclear Waste**, sebagai pertanggungjawaban akademik Guru Besar pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung.

Naskah orasi ilmiah ini dibagi dalam 5 bagian utama. Pada bagian pertama (Pendahuluan) dijelaskan secara umum tentang reaksi nuklir, radiasi nuklir dan peran energi nuklir dalam pembangunan berkelanjutan. Bagian kedua menguraikan tentang reaktor nuklir, bahan bakar nuklir, serta pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Pengelolaan bahan bakar dan limbah nuklir untuk mencapai *zero release nuclear waste* diuraikan dalam bagian ketiga. Bagian ke-empat merangkum apa yang telah diuraikan sebelum, dan kemudian diakhiri dengan rencana kegiatan penelitian dan pengembangan ke depan pada bagian ke-lima.

Naskah orasi ilmiah ini tentu masih jauh dari sempurna. Oleh sebab itu kritik dan saran sangat diharapkan. Semoga tulisan ini dapat memberikan setitik sumbangsih dalam pengembangan industri nuklir

bagi NKRI, serta menambah wawasan dan inspirasi yang bermanfaat bagi para pembaca yang budiman..

Hormat saya,

Abdul Waris

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI	v
1. PENDAHULUAN	1
1.1. Reaksi nuklir dan energi nuklir	1
1.2. Efek hormesis dari radiasi nuklir	4
1.3. Energi nuklir dan pembangunan berkelanjutan	5
2. PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR	6
2.1. Reaktor nuklir	6
2.2. Bahan bakar nuklir	8
2.3. Masalah dengan PLTN	13
3. PENGELOLAAN BAHAN BAKAR DAN LIMBAH NUKLIR	16
3.1. Metode pengelolaan limbah nuklir	16
3.2. Reprocessing & Recycling	19
3.3. Menuju <i>Zero Release Nuclear Waste</i>	21
3.3.1. Nuclear Equilibrium State	21
3.3.2. Daur ulang limbah nuklir pada beberapa jenis reaktor nuklir	26
3.3.3. Perpustakaan data Nuklir untuk daur ulang limbah nuklir	28
3.3.4. Skenario SUPEL	31
3.3.5. Thorium dan MSR	33

4. PENUTUP	35
5. RENCANA KE DEPAN	36
UCAPAN TERIMA KASIH	36
DAFTAR PUSTAKA	39
CURRICULUM VITAE	45

PENGELOLAAN BAHAN BAKAR DAN LIMBAH NUKLIR: MENUJU *ZERO RELEASE NUCLEAR WASTE*

1. PENDAHULUAN

Ketika mendengar kata “nuklir”, mungkin yang langsung terbayang dalam benak sebagian orang adalah bom atom yang dijatuhkan di Hiroshima dan Nagasaki, Jepang untuk mengakhiri Perang Dunia II. Atau kecelakaan nuklir di Chernobyl, Ukraina, Uni Sovyet pada 26 April 1986 dan kecelakaan nuklir di Fukushima, Jepang yang dipicu oleh tsunami setinggi 10 meter di sepanjang pantai timur laut Jepang dengan puncak tertinggi mencapai 40,5 m di Miyako, Iwate pada 11 Maret 2011 [1, 2].

1.1. Reaksi Nuklir dan Energi Nuklir

Penelitian tentang reaksi nuklir berawal dari penemuan radiasi alfa (α) dan partikel beta (β) oleh Henri Becquerel pada tahun 1896. Penemuan tersebut diberi nama “radioaktivitas” oleh Pierre Curie dan Marie Curie pada tahun yang sama. Di kemudian hari istilah radiasi diubah menjadi partikel, karena diamati memang partikel α dan partikel β [3].

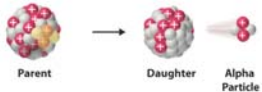
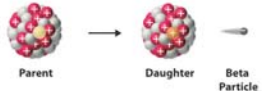
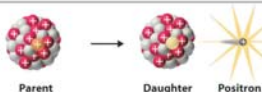
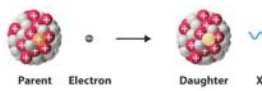
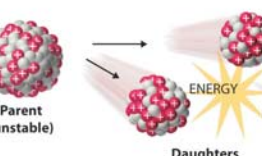
Reaksi nuklir ada peristiwa perubahan inti atom secara spontan (peristiwa peluruhan inti atom) atau karena gangguan (induksi) dari luar (seperti reaksi fisi nuklir yang diinduksi oleh neutron dari luar inti). Sebagai catatan reaksi fisi dapat juga terjadi secara spontan (*spontaneous fission*). Jadi reaksi nuklir adalah reaksi yang terjadi dalam inti atom. Sebagai perbandingan, reaksi kimia hanya melibatkan elektron dalam atom.

Reaksi nuklir menghasilkan perubahan unsur/elemen, sementara reaksi kimia tidak mengubah unsur [4]. Unsur yang dapat mengalami peluruhan disebut unsur/bahan radioaktif.

Untuk menyamakan persepsi, berikut dijelaskan beberapa tambahan istilah.

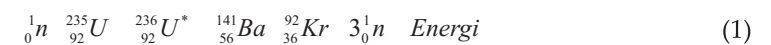
Istilah	Makna	Keterangan
Unsur/elemen	Material yang terdiri dari atom -atom yang memiliki jumlah proton yang sama	Contoh: Hidrogen (H), Uranium (U) dan Plutonium (Pu)
Isotop	Varian dari elemen yang memiliki jumlah netron yang berbeda.	Setiap isotop dari suatu elemen mempunyai jumlah proton yang sama dalam setiap atomnya.
Nuklida	Inti atom (inti isotop)	Reaksi nuklir adalah reaksi yang melibatkan inti atom
Logam berat (HM, <i>heavy metals</i>)	Isotop-isotop dari unsur yang merupakan anggota kelompok aktinida (Actinium (Ac) sampai Lawrencium (Lr)) ditambah Radium (Ra)	Dapat mengalami reaksi fisi dalam reaktor nuklir
Produk akhir rantai peluruhan logam berat	Isotop-isotop yang merupakan anggota unsur Thallium (Tl) sampai Francium (Fr)	Tidak dapat mengalami reaksi fisi dalam reaktor nuklir
Produk Fisi (FP, <i>fission products</i>)	Isotop-isotop yang bukan merupakan HM dan produk akhir rantai peluruhan HM. Isotop-isotop ini dihasilkan dari reaksi fisi.	Tidak dapat mengalami reaksi fisi dalam reaktor nuklir

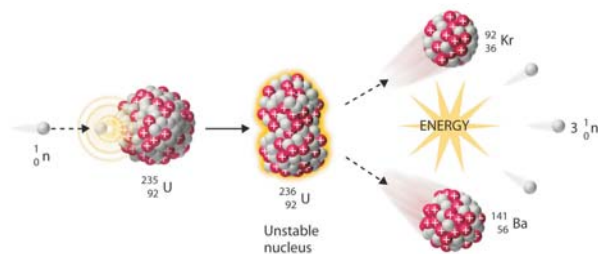
Beberapa contoh reaksi peluruhan inti atom diberikan dalam Gambar 1 berikut [5].

Decay Type	Radiation Emitted	Generic Equation	Model
Alpha decay	${}^4_2\alpha$	${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-2}^{A-4}X' + {}^4_2\alpha$	 Parent → Daughter + Alpha Particle
Beta decay	${}^0_{-1}\beta$	${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AX' + {}^0_{-1}\beta$	 Parent → Daughter + Beta Particle
Positron emission	${}^0_{+1}\beta$	${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AX' + {}^0_{+1}\beta$	 Parent → Daughter + Positron
Electron capture	X rays	${}_Z^AX + {}^0_{-1}e \rightarrow {}_{Z-1}^AX' + \text{X ray}$	 Parent + Electron → Daughter + X ray
Gamma emission	${}^0_0\gamma$	${}_Z^AX^* \xrightarrow{\text{Relaxation}} {}_Z^AX' + {}^0_0\gamma$	 Parent (excited nuclear state) → Daughter + Gamma ray
Spontaneous fission	Neutrons	${}_Z^AX + {}^1_0n \rightarrow {}_Z^BX + {}_Z^CX' + C^1_0n$	 Parent (unstable) → Daughters + ENERGY + Neutrons

Gambar 1: Reaksi peluruhan inti atom

Contoh reaksi fisi nuklir yang diinduksi oleh netron ditunjukkan pada persamaan reaksi dan Gambar 2 berikut [6]. Dua isotop baru yang dihasilkan dari reaksi fisi ini (contohnya ${}^{141}_{56}\text{Ba}$ dan ${}^{92}_{36}\text{Kr}$ disebut sebagai produk fisi (FP = *fission product*).





Gambar 2: Contoh reaksi fisi nuklir

Besarnya energi yang dihasilkan dari reaksi fisi nuklir (pembelahan inti atom) adalah 200 MeV (2×10^8 eV). Sebagai pembandingan besarnya energi yang dihasilkan dari reaksi antara 1 atom karbon dengan 2 atom oksigen (pembakaran minyak bumi dan batubara) adalah 3 - 4 eV.

1.2. Efek Hormesis dari Radiasi Nuklir

Radiasi nuklir di Bumi sudah ada sejak Bumi diciptakan sekitar 4,6 milyar tahun yang lalu. Sesungguhnya kita hidup ditengah-tengah radiasi alamiah pada level tertentu yang berasal dari radiasi kosmik dari luar Bumi (luar angkasa) dan material radioaktif dari bumi.

Tubuh kita mempunyai mekanisme untuk memperbaiki kerusakan yang timbul karena paparan radiasi nuklir dalam batas nilai tertentu. Batasan dosis radiasi yang dapat diterima bergantung pada sumber radiasi.

Menurut penelitian (ada > 1000 studi), pada tingkat radiasi nuklir tertentu, sedikit di atas radiasi alamiah, radiasi nuklir justru memberikan manfaat bagi tubuh manusia. Hal ini dikenal sebagai *hormesis effect* [6].

Sebagai contoh batuan radioaktif di wilayah Kerala, India memancarkan radiasi 10 kali lebih tinggi dari rata-rata radiasi alam di Amerika. Tetapi dilaporkan bahwa penduduk di wilayah tersebut memiliki tingkat kesehatan yang terbaik dibandingkan seluruh wilayah India yang lain [6].

1.3. Energi Nuklir dan Pembangunan Berkelanjutan

Konsep pembangunan berkelanjutan datang dengan isu “trilemma”, yaitu pertumbuhan ekonomi berkelanjutan, suplai energy dan sumber daya, serta pelestarian lingkungan. Kita harus mencari sumber energi yang dapat menyuplai energi secara masif tanpa mengganggu lingkungan.

Sebagai sumber energi yang bebas emisi gas rumah kaca (*smoke free energy source*), energi nuklir dapat menyuplai energi untuk manusia hingga jutaan tahun dengan memanfaatkan uranium dari air laut [8] dan thorium. Cadangan uranium dalam air laut adalah 3 kali uranium di kerak Bumi, sedangkan cadangan thorium adalah 3 kali cadangan uranium dalam kerak Bumi. Sebagai ilustrasi, Tabel 1 berikut memberikan gambaran betapa masifnya energi nuklir [9].

Tabel 1 Perbandingan energi

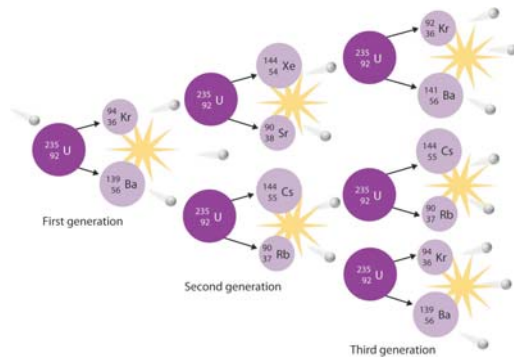
Sumber energi	Energi per kg bahan bakar	Bahan bakar per 1000 MWe per tahun
Fisi Nuklir	^{a)} 50.000 kWh	30 ton
Batubara	3 kWh	2.600.000 ton
Minyak bumi	4 kWh	2.000.000 ton

^{a)} Tanpa daur ulang

2. PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR

2.1. Reaktor Nuklir

Agar energy nuklir dapat dimanfaatkan dengan baik, maka reaksi fisi nuklir harus berlangsung secara kontinyu (reaksi fisi berantai). Reaktor nuklir adalah suatu peralatan dimana reaksi fisi berantai terkendali. Lawan dari reaktor nuklir adalah bom atom (bom nuklir) yaitu suatu devais dimana reaksi fisi berantai tidak terkendali. Pada Gambar 3 diberikan contoh reaksi fisi berantai [10].



Gambar 3: Contoh reaksi fisi berantai

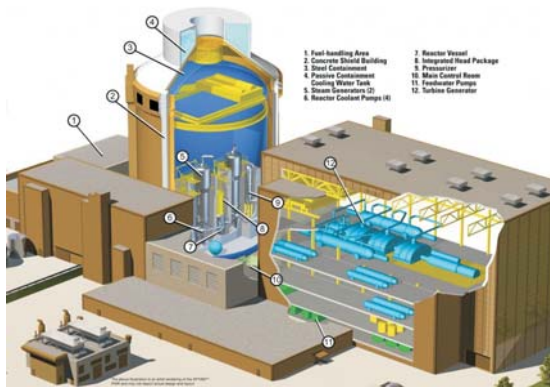
Dengan demikian dalam sebuah reaktor nuklir dapat diproduksi banyak sekali unsur dengan sejumlah isotop yang dimiliki masing-masing unsur tersebut sehingga ada lebih dari 1300 isotop (nuklida) yang mungkin dihasilkan dalam reaktor nuklir.

Reaktor nuklir dapat dikelompokkan menjadi reaktor riset (*research reactor*), reaktor pembiak (*breeder reactor*), dan reaktor daya (*power reactor*).

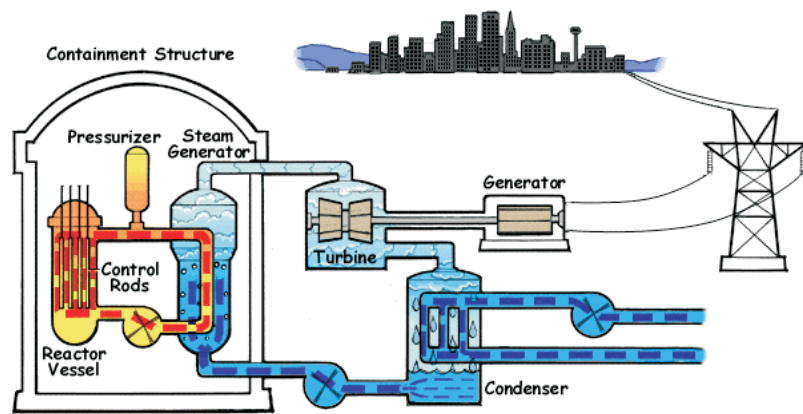
Reaktor riset dikenal juga sebagai reaktor tidak berdaya (*zero power reactor*), karena memiliki daya keluarannya yang kecil, sekitar ratusan kWth - 30 MWth. Reaktor pembiak digunakan menghasilkan material bahan bakar baru atau material untuk bom nuklir. Reaktor daya merupakan sumber energi bagi pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Daya keluaran sebuah PLTN bervariasi mulai dari beberapa puluh MWe hingga 1650 MWe (4500 MWth).

Ada beberapa tipe reaktor daya nuklir yang sedang beroperasi di seluruh dunia saat ini, yaitu: reaktor air bertekanan (*pressurized water reactor* (PWR)), reaktor air mendidih (*boiling water reactor* (BWR)), reaktor air berat bertekanan (*pressurized heavy, water reactor* (PHWR)), VVER (*Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reaktor*; WWER = *Water-Water Power Reactor*), PWR yang dibuat oleh Rusia, reaktor gas suhu tinggi (*high temperature gas cooled reactor* (HTGR)), Magnox GCR (*gas cooled reactor*), AGR (*advanced gas cooled reactor*), LMFBFR (*liquid metal fast breeder reactor*), dll.

Tampak 3-D dari sebuah PLTN dengan reaktor PWR diberikan pada Gambar 4 [11]. Sedangkan diagram skematik dari prinsip kerja PLTN dengan reaktor PWR dapat dilihat pada Gambar 5 berikut [12]. Dari Gambar 5 terlihat dengan jelas bahwa PLTN sama persis dengan pembangkit listrik tenaga diesel atau batubara, kecuali sumber panas berasal dari reaktor nuklir.



Gambar 4: Ilustrasi 3D dari PLTN dengan reaktor PWR



Gambar 5: Diagram skematik PLTN tipe PWR

2.2. Bahan Bakar Nuklir

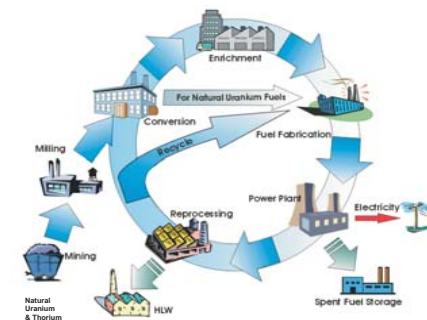
Bahan bakar reaktor nuklir saat ini adalah uranium. Uranium secara alamiah memiliki 3 isotop seperti yang diberikan pada Tabel 2 berikut [13].

Tabel 2 Isotop uranium alam

Isotop	Kelimpahan (%)	Massa (u)	Umur paroh (tahun)
$^{234}_{92}\text{U}$	0,0055	234,0410	$2,48 \times 10^5$
$^{235}_{92}\text{U}$	0,7200	235,0439	$7,13 \times 10^8$
$^{238}_{92}\text{U}$	99,2745	238,0508	$4,47 \times 10^9$

Dari ketiga isotop uranium ini, hanya ^{235}U yang dapat mengalami reaksi fisi yang diinduksi oleh neutron termal. Isotop seperti ^{235}U disebut material fisi (*fissile material*).

Proses yang dialami bahan bakar nuklir (uranium) mulai dari penambangan sampai dikeluarkan kembali dari reaktor untuk proses lebih lanjut merupakan rangkaian proses yang sangat panjang. Rangkaian proses ini dikenal sebagai siklus bahan bakar nuklir (*nuclear fuel cycle*). Siklus bahan bakar nuklir secara skematik diberikan dalam Gambar 6 [14].



Gambar 6: Siklus bahan bakar nuklir

Siklus bahan bakar nuklir (BBN) mencakup proses penambangan, penggilingan, konversi, pengayaan, fabrikasi bahan bakar, pengisian dan penggunaan bahan bakar dalam reaktor, pengambilan bahan bakar sisa

(*spent fuel*) dari reaktor, penyimpanan sementara (*spent fuel storage*), pemrosesan ulang (*reprocessing*), daur ulang dan pembuangan limbah nuklir. Rangkaian proses dari penambangan uranium sampai pengisian BBN ke dalam reaktor disebut *front-end fuel cycle*. Sains dan teknologi terkait siklus ini dipandang sudah sangat mapan. *Back-end fuel cycle* mencakup seluruh proses setelah bahan bakar sisa dikeluarkan dari reaktor. Siklus yang terakhir ini merupakan tantangan tersendiri bagi para *nuclear scientists & engineers*.

Dalam siklus bahan bakar nuklir terdapat proses/tahap yang memungkinkan untuk pengalihan fungsi uranium sebagai BBN menjadi bahan senjata nuklir, yaitu pada tahap pengayaan uranium dan pemrosesan ulang limbah nuklir. Oleh karena itu selain 5 negara anggota tetap Dewan Keamanan PBB, hanya Jepang yangizinkan untuk memiliki instalasi pengayaan uranium dan instalasi pemrosesan ulang sisa bahan bakar nuklir.

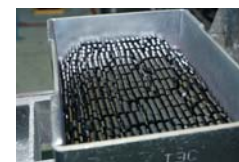
Uranium pertama kali digunakan sebagai bahan bakar reaktor nuklir dalam bentuk logam. Logam uranium sangat reaktif (mudah bereaksi dengan elemen non-metalik dan membentuk senyawa intermetalik), memiliki titik lebur yang rendah ($< 1200^{\circ}\text{C}$), serta mudah mengalami perubahan dimensi akibat iradiasi sehingga selanjutnya tidak digunakan lagi sebagai bahan bakar reaktor. Bahan bakar uranium dalam bentuk keramik dengan senyawa UO_2 merupakan yang paling baik saat ini. Sifat fisika dari UO_2 diberikan pada Tabel 3 [13].

Tahapan penyiapan uranium sehingga siap menjadi bahan bakar nuklir adalah sebagai berikut [13-15].

- ▶ Penambangan untuk menghasilkan uranium alam berbentuk padat yang disebut "*yellow cake*", dan siap dijual sebagai U_3O_8
- ▶ Konversi pertama dari U_3O_8 ke UF_6 (gas) sehingga dapat diperkaya
- ▶ Pengayaan : meningkatkan konsentrasi isotop yang dapat berfisi ^{235}U (0.71% dalam uranium alam menjadi 3-5%) sehingga dapat digunakan secara efisien dalam sebagian besar PLTN
- ▶ Konversi kedua dari UF_6 menjadi UO_2 . Agar dapat digunakan sebagai bahan bakar nuklir, UF_6 yang sudah diperkaya dalam fase gas dikonversi bubuk uranium dioksida (UO_2), kemudian dicetak dan dipadatkan menjadi bahan keramik berbentuk silinder dengan diameter 1-cm dan tinggi 1-cm, yang dikenal sebagai *fuel pellet*
- ▶ Fabrikasi elemen/batang bahan bakar (*fuel rod*) dan asembli bahan bakar (*fuel assembly*).



Yellow cake



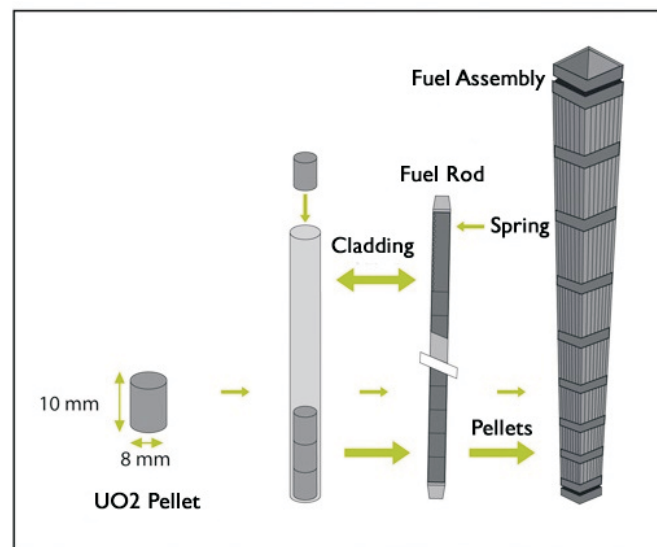
Fuel pellet



Tabel 3 Sifat Fisika dari UO_2

Parameter Fisika	Nilai
Titik lebur	2865 °C (5189 °F)
Densitas	10,97 g/cc
Konduktivitas Termal	4,777 $\times 10^{-3}$ W/m.K pada 20 °C 1,91 $\times 10^{-3}$ W/m.K pada 1000 °C
Koefisien ekspansi termal (per °C)	$\sim 1 \times 10^{-5}$ / °C (0 – 1000 °C)
Modulus elastisitas	1,72 $\times 10^{11}$ Pa (25 $\times 10^6$ psi)
Tipe sel	Face-centered cubic (FCC)

Contoh susunan dan geometri bahan bakar nuklir dapat diberikan pada Gambar 7 berikut [15].



Gambar 7: Contoh asembli bahan bakar nuklir

Data jenis bahan bakar, kelongsong (*cladding*), jenis asembli bahan bakar dan tingkat pengayaan uranium untuk beberapa tipe PLTN diberikan dalam Tabel 4 berikut [16].

Tabel 4 Klasifikasi bahan bakar dari PLTN

Tipe PLTN	Jenis BB	Kelongsong BB	Jenis Asembli BB	Pengayaan U
Magnox	U- metal	Magnox alloy	-	Natural
AGR	UO_2	Stainless steel	Circular array of pins in graphite sleeve	2 – 4 %
BWR	UO_2	Zircaloy-2	Square array	Up to 4.95%
PWR	UO_2	Zircaloy-4	Square array	Up to 4.95%
PHWR	UO_2	Zircaloy-4	Circular bundle	Natural
VVER	UO_2	E110, E635	Hexagonal array	Up to 4.95%
RBMK	UO_2	E110, E635	Circular array	Up to 2.8%

2.3. Masalah dengan PLTN

Ada 3 hal penting yang biasa dikaitkan dengan pemanfaatan energi nuklir, yaitu: keselamatan, non-proliferasi, dan pengelolaan limbah nuklir. Terlepas dari masalah bencana alam seperti tsunami, tingkat keselamatan PLTN sangat tinggi dan hanya bisa disaingi oleh tingkat keselamatan industri pesawat terbang. Hal ini dapat direalisasikan karena industri PLTN mempunyai sistem keamanan berlapis dengan kualifikasi keselamatan yang sangat tinggi. Non-proliferasi artinya tidak menyebarkan bahan nuklir untuk pembuatan senjata nuklir atau terorisme. Masalah

non-proliferasi lebih merupakan masalah politik karena terkait dengan kebijakan internasional tentang negara mana saja yang boleh memiliki senjata nuklir. Menurut hemat penulis, masalah utama terkait pemanfaatan PLTN adalah bagaimana mengelola limbah nuklir [8]. Limbah nuklir dikelompokkan menjadi sebagai berikut [17-18].

- *LLW (low level waste)*: dihasilkan dalam semua kegiatan yang melibatkan bahan radioaktif. Contohnya adalah pakaian, peralatan, kertas, sumber radiasi yang sudah lama
- *MLW (medium level waste)*: bahan radioaktif dari sisa bahan bakar dengan umur-paroh ~30 tahun (contoh: ^{137}Cs dan ^{90}Sr)
- *HLW (high level waste)*: bahan radioaktif dari sisa bahan bakar dengan umur-paroh >100 tahun

Pada kenyataannya, sisa bahan bakar adalah MLW dan HLW yang sebagian besar terdiri dari isotop-isotop yang masih dapat digunakan kembali sebagai bahan bakar diantaranya adalah: uranium itu sendiri dan sebagian besar HLW. HLW terdiri dari dua kelompok, yaitu *trans-uranium* (TRU, yaitu unsur-unsur dengan nomor atom lebih besar dari nomor atom uranium) dan produk fisi berumur panjang (*long-lived fission products*, LLFP). TRU terdiri dari plutonium (Pu) dan aktinida minor ((MA, *minor actinides*). Dikatakan aktinida minor karena memang konsentrasinya sedikit. Aktinida minor terdiri dari Neptunium (Np), Americium (Am), dan Curium (Cm). Data ringkas tentang LLFP, Pu dan MA diberikan dalam Tabel 5 berikut [17-18].

Tabel 5 Data umur paroh LLFP, Pu dan MA

LLFP		Pu		MA	
Isotop	Umur paroh (tahun)	Isotop	Umur paroh (tahun)	Isotop	Umur paroh (tahun)
^{79}Se	$3,27 \times 10^5$	^{238}Pu	$8,77 \times 10^1$	^{237}Np	$2,14 \times 10^6$
^{93}Zr	$1,53 \times 10^6$	^{239}Pu	$2,41 \times 10^4$	^{241}Am	$4,33 \times 10^2$
^{99}Tc	$2,11 \times 10^5$	^{240}Pu	$6,56 \times 10^3$	$^{242\text{m}}\text{Am}$	$1,41 \times 10^2$
^{107}Pd	$6,5 \times 10^6$	^{241}Pu	$1,43 \times 10^1$	^{243}Am	$7,37 \times 10^3$
^{126}Sn	$2,30 \times 10^5$	^{242}Pu	$3,73 \times 10^5$	^{243}Cm	$2,91 \times 10^1$
^{129}I	$1,57 \times 10^7$			^{244}Cm	$1,81 \times 10^1$
^{138}Cs	$2,3 \times 10^5$			^{245}Cm	$8,50 \times 10^3$
				^{246}Cm	$4,80 \times 10^3$

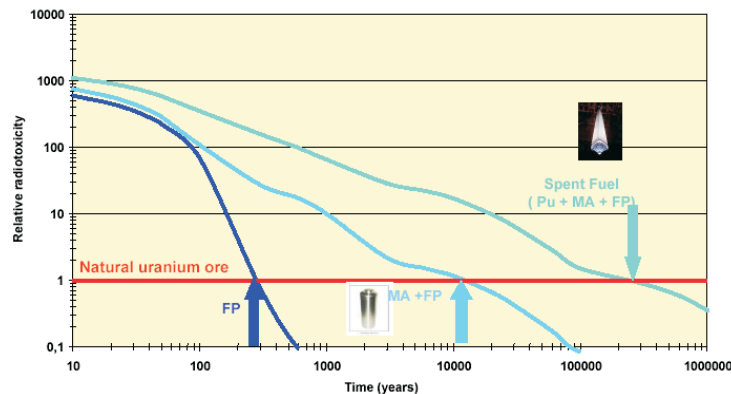
Contoh perbandingan komposisi antara BBN awal yang dimasukkan dan sisa BBN pada PLTN jenis PWR diberikan pada Tabel 6 berikut [19].

Tabel 6 Perbandingan komposisi BBN dan sisa BBN

Material	BBN awal	Sisa BBN	Jenis limbah
Aktinida Minor	0,0	0,065%	TRU (HLW)
^{236}U	0,0	0,46%	
Pu	0,0	0,89%	TRU (HLW)
Produk Fisi	0,0	3,3%	HLW
^{235}U	3,3%	0,80%	
^{238}U	96,7%	94,3%	

Pertanyaannya adalah ada apa dengan HLW? Gambar 8 berikut menunjukkan evolusi dari radio-toksisitas sisa bahan bakar nuklir dibandingkan dengan radio-toksisitas uranium alam [19]. Dari grafik tersebut terlihat bahwa kita perlu menunggu selama 3×10^5 tahun agar total radio-toksisitas dari FP (termasuk LLFP), Pu dan MA berkurang menjadi = radiasi alamiah. Jika Pu dikeluarkan dari sisa bahan bakar nuklir, masih diperlukan 1×10^4 tahun agar level radio-toksisitasnya turun

menjadi = radiasi alamiah. Sedangkan jika Pu dan MA tidak ada dalam sisa bahan bakar nuklir, masih diperlukan 3×10^2 tahun agar level radio-toksitasnya lebih kecil dari radiasi alamiah.



Gambar 8: Evolusi radio-toksitas limbah nuklir

3. PENGELOLAAN BAHAN BAKAR DAN LIMBAH NUKLIR

3.1. Metode Pengelolaan Limbah Nuklir

Pertanyaan selanjutnya adalah bagaimana mengelola sisa bahan bakar nuklir atau limbah nuklir, terutama HLW? Ada 2 opsi yang dapat dipilih yaitu *open cycle* (OC) dan *Closed cycle* (CC). OC juga dikenal Sebagai *once through cycle* (OTC). OTC adalah opsi dimana sisa BBN setelah dikeluarkan dari reaktor dan didinginkan selama 5 – 30 tahun, kemudian dibuang ke tempat pembuangan tertentu. CC adalah opsi dimana sebagian atau seluruh sisa BBN digunakan kembali sebagai bahan bakar dalam reaktor.

Ada beberapa metode untuk OTC, yaitu:

- Dibuang ke angkasa luar (*outer space disposal*)
- Dibuang ke bawah gunung es (*ice-sheet disposal*)
- Dibuang ke dasar laut (*sub-seabed disposal*)
- Dibuang ke pembuangan bawah tanah (*deep geological disposal*)

Dari 4 metode OTC, hanya metode pembuangan bawah tanah yang paling aman dan terjamin untuk dilakukan. Secara ideal tempat pembuangan bawah tanah harus dapat bertahan sampai 10^5 - 10^6 tahun. Namun sayangnya *civil engineer* hanya bisa menjamin ketahanan konstruksi bangunan sampai 1000 tahun. Vitrifikasi pada saat pengepakan sebelum dibuang dapat memperlama daya tahan sistem pengepakan HLW hingga 10000 tahun. Proses vitrivikasi merupakan *lesson learned* dari Kerajaan Babilonia dan Mesir Kuno.

Sebelum pengepakan assembly sisa BBN didinginkan dalam kolam air sedalam > 8 meter di sekitar PLTN selama 5 – 30 tahun untuk membuang panas dan mengurangi tingkat radiasi yang dihasilkan. Jika pendinginan dilakukan dalam waktu lebih lama maka bahan radioaktif yang tersisa dalam assembly sisa BBN tinggal HLW saja.

Keputusan untuk memilih opsi OTC atau *recycling* harus merupakan kebijakan nasional suatu negara yang memanfaatkan energi nuklir. Opsi pengelolaan limbah nuklir ini menentukan total biaya pembangunan, pengoperasian dan *decommissioning* sebuah PLTN.

Amerika merupakan salah satu Negara yang awalnya memilih opsi OTC dengan menyiapkan tempat pembuangan bawah tanah di Yucca

OTC memiliki kelebihan, antara lain: tidak perlu *reprocessing* sehingga LLW dan MLW menjadi sangat sedikit, kelongsong bahan bakar tidak perlu dilepas sehingga MLW berkurang, dan tidak ada Pu dalam transportasi sisa BBN sehingga tidak dapat dicuri untuk tujuan non-sipil.

um Guru Besar
itut Teknologi Bandung



Forum Guru Besar
Institut Teknologi Bandung

pemisahan kandungan sisa BBN secara kimia menjadi U, Pu, MA, FP, dan lain-lain.

Kelebihan opsi daur ulang sisa BBN adalah: HLW terminimalisasi sehingga masalah penyimpanan/pembuangan limbah nuklir dapat diminimalisasi; dapat memanfaatkan kembali mengambil ^{235}U , ^{238}U , Pu dan MA, atau digunakan dalam FBR sehingga meningkatkan jumlah cadangan BBN menjadi 50 kali; serta vitrifikasi (*pengemasan limbah*) menjadi lebih mudah dibandingkan dengan OTC.

Kekurangan opsi daur ulang sisa BBN adalah: volume LLW dan MLW menjadi meningkat dan emisi radiasi dari pabrik *reprocessing* lebih tinggi dibandingkan dengan fasilitas penyimpanan sementara limbah OTC.

Daur ulang PU dan MA mulai dipikirkan pada saat pengembangan reaktor nuklir cepat (FBR (*fast breeder reactor*)), karena bahan bakar FBR terdiri dari 20% Pu dan 80% Uranium alam. Seiring dengan kurang berkembangnya komersialisasi FBR, maka perhatian beralih ke PLTN jenis lain yaitu reaktor daya termal.

Ide daur ulang Pu dalam PLTN jenis LWR (PWR dan BWR) baru muncul pada akhir tahun 1970an [21]. Pada pertengahan tahun 1990an Prancis dan UK mulai mengoperasikan pabrik pemrosesan sisa BBN. Pada waktu yang sama Prancis mulai menggunakan bahan bakar campur antara uranium dioksida dan plutonium dioksida yang dikenal dengan nama mixed oxide fuel (MOX) pada PWR. Pada awal tahun 2000an Jepang mulai membangun instalasi pengolahan sisa BBN di Rokkasho Mura, Iwate Prefecture dan mulai beroperasi tahun 2013. Sebelum

pengoperasian pengolahan sisa BBN di Rokkasho Mura, Jepang mengirim sisa BBN yang dimiliki ke Prancis.

Dari sudut pandang non-proliferasi nuklir, daur ulang Pu saja tanpa dicampur dengan MA sangat beresiko karena jika Pu tersebut dicuri setelah dipisahkan di instalasi pengolahan sisa BBN akan dengan mudah dikonversi menjadi senjata nuklir. Oleh karena itu akan lebih baik jika Pu dan MA didaur ulang secara bersamaan [23]. Jika hal ini dapat dilakukan maka mimpi *zero release nuclear waste* dapat direalisasikan.

3.3. Menuju Zero Release Nuclear Waste

Konsep *zero release nuclear waste* sangat menarik jika dapat direalisasikan. Jika dapat diwujudkan, besar kemungkinan penerimaan masyarakat (*public acceptance*) terkait energi nuklir akan meningkat.

Pada bagian ini akan dijelaskan hal-hal yang sudah diteliti penulis terkait dengan pengelolaan bahan bakar dan limbah nuklir guna merealisasi konsep *zero release nuclear waste*. Untuk merealisasi konsep ini maka seluruh sisa BBN atau minimum Pu dan MA harus didaur ulang dalam PLTN.

3.3.1. Nuclear Equilibrium State

Perubahan komposisi teras reaktor karena perubahan densitas berbagai isotop melalui mekanisme reaksi nuklir seperti reaksi fisi, tangkapan neutron, peluruhan radioaktif dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\frac{dN_i}{dt} = -(\lambda_i + \phi \sigma_{a,i} + R_i)N_i + \sum_j \lambda_{j \rightarrow i} N_j + \phi \sum_j \sigma_{j \rightarrow i} N_j + S_i, \quad (2)$$

dimana: N_i : densitas dari nuklida (isotop) ke- i , ϕ : fluks, λ_i : tetapan peluruhan dari nuklida ke- i , R_i : konstanta pengeluaran dari nuklida ke- i , $\lambda_{j \rightarrow i}$: tetapan peluruhan dari nuklida ke- j untuk menghasilkan nuklida ke- i , $\sigma_{j \rightarrow i}$: penampang lintang transmudasi mikroskopik dari nuklida ke- j untuk menghasilkan nuklida ke- i , S_i : laju suplai dari nuklida ke- i , $\sigma_{a \rightarrow i}$: penampang lintang absorpsi mikroskopik dari nuklida ke- i , mencakup fisi, penampang lintang tangkapan neutron, (n, 2n), (n, 3n) dan penampang lintang transmudasi nuklir yang lain.

Pers. (1) adalah persamaan diferensial bergantung waktu yang standard, yang lazim digunakan untuk analisis perubahan komposisi bahan bakar (*fuel depletion analysis*) dalam reaktor. Persamaan ini disebut juga persamaan (model) burnup standard.

Untuk perhitungan seluruh teras reaktor, persamaan (1) dijabarkan lebih lanjut dengan menambahkan parameter/indeks yang memperhitungkan geometri, grup energi, dan jumlah asembli bahan bakar.

Seperti yang telah dijelaskan di atas, terdapat lebih dari 1300 nuklida yang mungkin diproduksi dalam reaktor nuklir sehingga pers. (1) merupakan persamaan terkopling dengan >1300 baris.

Untuk pemanfaatan energi nuklir jangka panjang, kita dapat mengasumsikan bahwa keadaan kesetimbangan nuklir (*nuclear equilibrium state*) akan dicapai, yang dapat diartikan bahwa densitas masing-masing nuklida dalam reaktor akan konstan dan proses pengisian

ulang bahan bakar berlangsung secara kontinyu [24-25]. Ternyata menurut referensi yang dipublikasikan kemudian telah ditunjukkan bahwa densitas sebagian besar TRU akan mencapai kesetimbangan setelah 60-90 tahun [26]. Sebagai catatan reaktor nuklir saat ini dapat beroperasi hingga 60 tahun dan dapat diperpanjang hingga 90 tahun dengan mengganti beberapa komponen tertentu. Dengan demikian pers. (2) dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\frac{dN_i}{dt} = -(\lambda_i + \phi \sigma_{a,i} + R_i)N_i + \sum_j \lambda_{j \rightarrow i} N_j + \phi \sum_j \sigma_{j \rightarrow i} N_j + S_i = 0 \quad (2)$$

Selanjutnya dibuat beberapa skenario daur ulang sisa BBN dalam PWR sebagai berikut dengan ketentuan bahwa semua FP dan semua isotop yang merupakan produk akhir rantai peluruhan alamiah dari logam berat dikeluarkan dari reaktor dengan laju standard PWR (33% per tahun).

- Kasus 1 : Semua HM dikeluarkan dari reaktor dengan laju standard.*
- Kasus 2 : Semua HM kecuali Pu dikeluarkan dari reaktor. Pu dikeluarkan dengan laju adalah 1/2 laju standard.*
- Kasus 3 : Semua HM kecuali Pu dikeluarkan dari reaktor. Pu dipertahankan tetap dalam reaktor (Daur ulang Pu)*
- Kasus 4 : Semua HM kecuali U dipertahankan dalam reaktor. U dikeluarkan dari reaktor dengan laju standard (Daur ulang Pu dan MA)*
- Kasus 5 : Semua HM dipertahankan dalam reaktor.*

Hasil yang diperoleh diberikan dalam Tabel 7 berikut [8, 27].

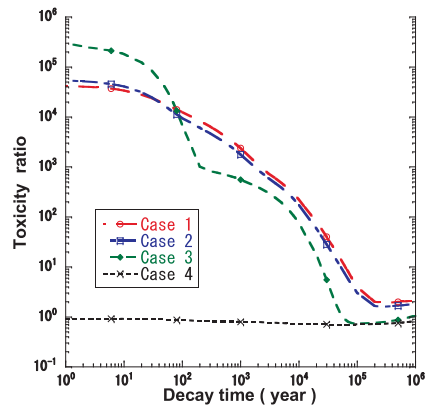
Tabel 7 Tingkat pengayaan U dan jumlah BBN per tahun

Kasus	Pengayaan (w/o)	Suplai BBN (t/y)* ¹	Flux (cm ⁻² . s ⁻¹)	Burnup (GWd/t)* ²	Kebutuhan U alam(t/y)	
					0.1 w/o tail	0.3 w/o tail
1	4.2	29.0	3.83 x 10 ¹⁴	37.9	195.4	276.3
2	4.0	28.8	3.80 x 10 ¹⁴	38.1	185.3	261.4
3	3.8	28.1	3.73 x 10 ¹⁴	39.0	169.2	237.9
4	3.6	27.6	3.71 x 10 ¹⁴	39.8	158.9	222.8
5	41.6	1.2	3.46 x 10 ¹⁴	952.7	79.4	117.5

*¹ ton per tahun, *² GWd per ton bahan bakar.

Dari tabel di atas terlihat untuk Kasus 1-4, kebutuhan pengayaan uranium, jumlah suplai BBN dan kebutuhan uranium alam menurun dengan bertambahnya jumlah HM yang didaur ulang dalam reaktor PWR. Jika semua sisa BBN tidak dikeluarkan dari reaktor, maka dibutuhkan pengayaan uranium yang sangat besar.

Rasio radio-toksistas dari sisa BBN yang dikeluarkan dari reaktor untuk masing-masing kasus terhadap radio-toksistas uranium alam diberikan pada Gambar 10 berikut [27]. Terlihat bahwa daur ulang Pu dapat mengurangi radio-toksistas total dari sisa BBN yang dikeluarkan dari reaktor.



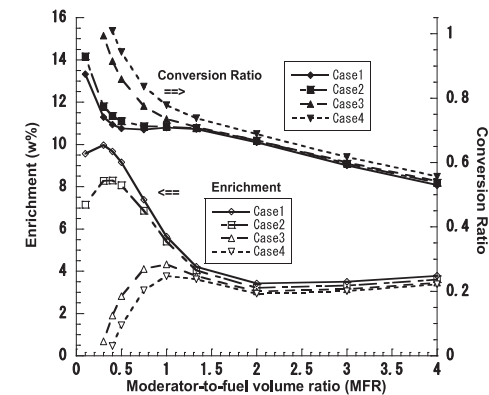
Gambar 10: Rasio radio-toksistas dari sisa BBN

Jika teras reaktor PWR dimodifikasi sedikit dengan mengubah perbandingan antara volume bahan bakar dengan moderator (MFR), diperoleh hasil yang lebih menarik lagi, seperti ditampilkan pada Grafik 11 berikut [28]. Untuk kasus-3 (daur ulang Pu) dan kasus-4 (daur ulang MA), jika MFR diubah menjadi 0.5, maka dengan pengayaan uranium ~ 1% atau tanpa pengayaan (uranium alam) reaktor dapat dioperasikan secara normal.

Hasil penelitian sejenis untuk reaktor BWR dapat dilihat pada referensi [29].

Meskipun sederhana, model keadaan kesetimbangan nuklir memberikan hasil yang hampir sama dengan kondisi riil reaktor, seperti kebutuhan pengayaan uranium, jumlah BBN, uranium alam, serta tingkat radio-toksistas.

Salah satu manfaat dari model keadaan kesetimbangan nuklir adalah untuk memprediksi kondisi yang ekstrim, seperti contoh kasus-5 di atas.



Gambar 10: Rasio radio-toksistas dari sisa BBN

3.3.2. Daur Ulang Limbah Nuklir pada Beberapa Jenis Reaktor Nuklir

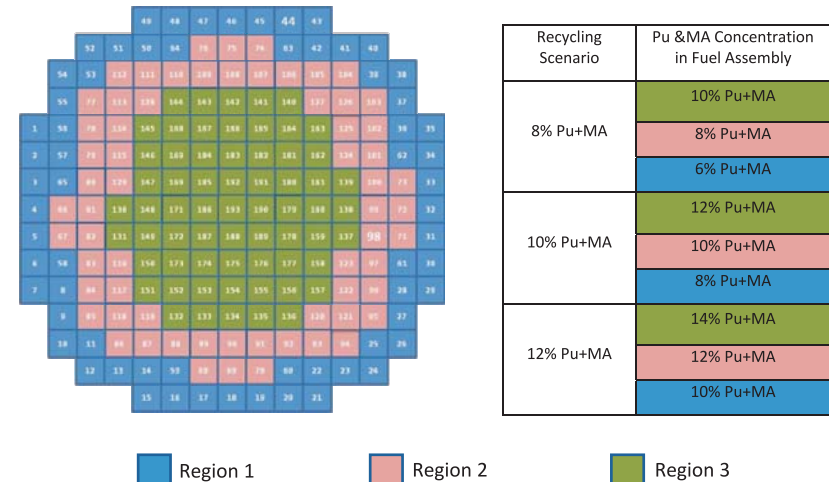
Selanjutnya akan diuraikan sebagian hasil penelitian tentang daur ulang limbah nuklir pada kondisi reaktor riil [30]. Reaktor PWR dengan spesifikasi seperti pada Tabel 8 dan komposisi sisa BBN (Pu dan MA) diberikan pada Tabel 9 [30].

Tabel 8 Spesifikasi Westinghouse PWR 3400 MWth

Thermal output (MWth)	3400
Fuel weight (kg)	94676,9
Burnup (GWD/MTU)	40,0
Number of assemblies	193
Fuel element array in assembly	17 x 17
Assembly dimension	21,4 x 21,4
Fuel pellet diameter (cm)	0,819
Average linear power density (W/cm)	178

Tabel 9 Komposisi isotop Pu & MA yang didaur-ulang

Plutonium		Minor Actinides	
Pu-238	1.81%	Np-237	16.67%
Pu-239	59.14%	Am-241	52.05%
Pu-240	22.96%	Am-242m	1.51%
Pu-241	12.13%	Am-243	29.23%
Pu-242	3.96%	Cm-245	0.54%



Gambar 12: Konfigurasi dan komposisi asembli BB dalam teras reaktor

Dilakukan 3 skenario daur seperti pada Gambar 12 dan diperoleh pengurangan cukup signifikan dari jumlah BBN yang harus disuplai kedalam reaktor dengan meningkatnya jumlah Pu dan MA yang didaur ulang seperti yang ditampilkan pada Tabel 10 dan 11 berikut.

Tabel 10
Komposisi BBN dan pengayaan U yang diperlukan

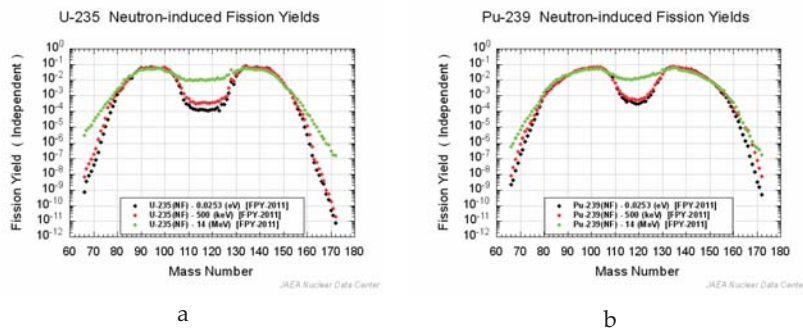
Skenario	Pengayaan U (%)	Konsentrasi Plutonium (%)	Konsentrasi MA (%)
I	2.70	7.20	0.80
II	1.52	9.02	1.00
III	1.32	10.77	1.19

Tabel 11
Jumlah U yang diperkaya yang diperlukan untuk tiap skenario

Skenario	Tanpa daur ulang (kg)	Dengan daur ulang Plutonium & MA (kg)
I	94676.9	83613,79
II		81818,19
III		79992,65

3.3.3. Perpustakaan Data nNuklir untuk Daur Ulang Limbah Nuklir

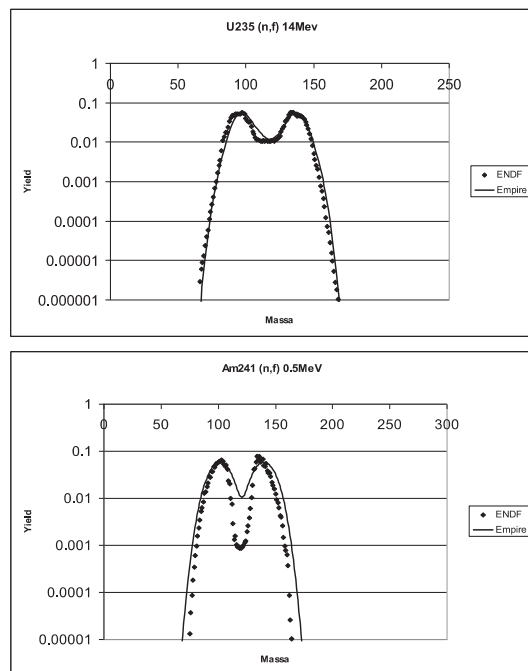
Penelitian tentang daur ulang sisa BBN atau limbah nuklir membuka wawasan baru sekaligus tantangan baru. Salah satu tantangan baru terkait dengan ketersediaan data nuklir untuk mendukung penelitian daur ulang limbah nuklir. Setiap reaksi nuklir memiliki peluang yang dinyatakan dengan penampang lintang reaksi (*reaction cross-section*). Sebagai contoh, untuk reaksi fisi peluang reaksi dinyatakan penampang lintang reaksi fisi (*fission cross-section*). Produk fisi – produk fisi yang dihasilkan dari suatu reaksi fisi juga bervariasi. Gambar 13 menampilkan distribusi produk fisi dari hasil reaksi fisi dari beberapa nuklida [31]. Grafik tersebut dikenal sebagai *fission yield*. *Fission yield* bergantung pada beberapa faktor, dan yang paling utama adalah bergantung pada nuklida yang mengalami reaksi fisi dan energi neutron yang menginduksi reaksi fisi. Data *fission yield* untuk uranium dan plutonium sudah tersedia dengan lengkap dalam perpustakaan data nuklir yang ada seperti ENDF (*Evaluated Nuclear Data File*), JENDL (*Japanese Evaluated Nuclear Data Library*), serta JEF (*Joint Evaluated Fission File*), tetapi untuk minor aktinida belum lengkap.



Gambar 13: *Fission yield* dari beberapa Aktinida

Dalam rangka usaha melengkapi kekurangan data tersebut penulis dan tim telah melakukan beberapa penelitian terkait. Tujuan jangka panjang dari penelitian terkait perpustakaan data nuklir adalah memodelkan reaksi spalasi yang dapat dimanfaatkan untuk transmudasi LLFP pada sistem reaktor hibrid yang menggabungkan antara reaktor nuklir dan pemercepat partikel (akselerator). Sistem ini dikenal sebagai ADS (*accelerator driven system*) [32]. Reaksi spalasi adalah reaksi fisi yang dipicu oleh partikel bermuatan (misalnya proton) yang dipercepat sehingga memiliki energi sangat tinggi ($0,5 \sim 4 \text{ GeV}$). Reaksi spalasi dapat menghasilkan hingga ratusan neutron. Neutron-netron ini selanjutnya digunakan untuk mengoperasikan reaktor nuklir sambil mentransmutasi LLFP atau MA.

Salah satu hasil yang ditampilkan dalam tulisan ini adalah hasil perhitungan *fission yield* berdasarkan modifikasi model RNRN (*Random Neck Rupture Model*) dari U. Brosa. Model RNRN didasarkan atas dua hipotesis, yaitu fisi multi-modal (*multimodal fission*) dan *scission* pada posisi acak pada neck. Model Brosa sering disebut sebagai MM-RNRN atau *MultiModal Random Neck Rupture Model*. Metode perhitungan secara detail tidak diberikan dalam tulisan ini, tetapi dapat dirujuk pada referensi [33-36]. Gambar 14 berikut menampilkan beberapa hasil perhitungan *fission yield* dengan metode yang telah dikembangkan.



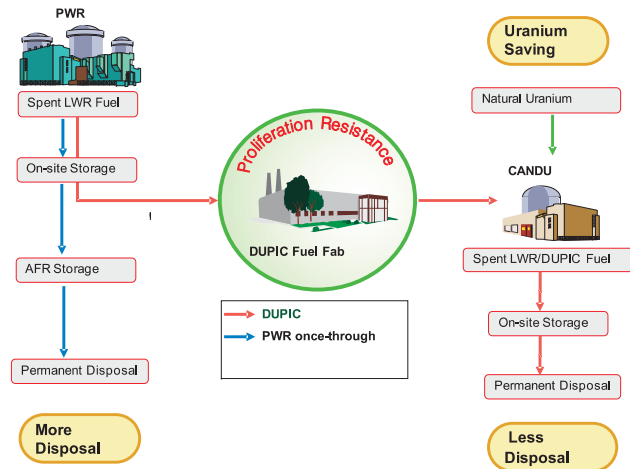
Gambar 15: Perbandingan fission yield untuk energi 0,5 MeV dan 14 MeV

3.3.4. Skenario SUPEL

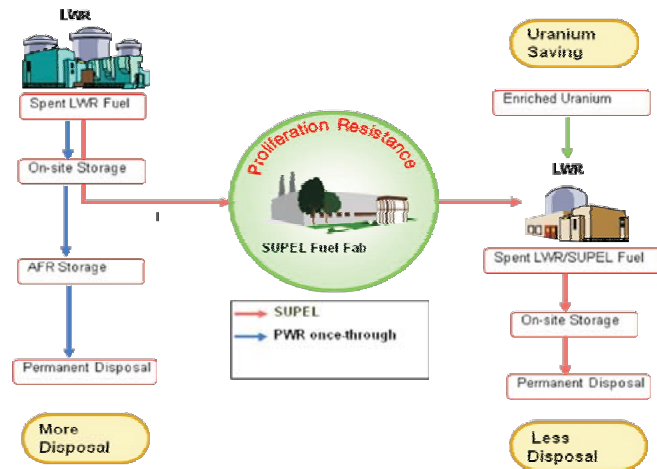
Seperti yang telah dijelaskan di atas, untuk melakukan daur ulang sisa BBN dibutuhkan tahapan *reprocessing*. Masalahnya adalah tidak semua negara dapat memiliki fasilitas *reprocessing*. Negara yang sangat maju dalam industri nuklir sekalipun, seperti Korea Selatan, secara aturan internasional tidak diizinkan memiliki instalasi *reprocessing*.

Untuk mengelola limbah nuklir tanpa tahap *reprocessing*, Korea Selatan mengembangkan konsep DUPIC (*Direct Utilization of spent PWR fuel In CANDU*), seperti yang diberikan pada Gambar 17 [37]. Akan tetapi untuk merealisasikan konsep DUPIC diperlukan 2 tipe reaktor, yaitu PWR dan CANadian Deuterium Uranium reactor (CANDU). Ide ini akan menjadi mahal untuk negara-negara tertentu, seperti Indonesia.

Mengingat negara kita memiliki keterbatasan dalam anggaran, tidak diizinkan memiliki fasilitas *reprocessing* limbah nuklir dan kalau ingin "go nuclear" kemungkinan besar hanya akan memilih satu jenis reaktor nuklir (apakah PWR atau BWR) untuk PLTN yang akan dibangun, maka penulis telah mengusulkan suatu skenario pemanfaatan energi nuklir bagi negara seperti Indonesia dengan nama skenario SUPEL (*Straight Utilization of sPEnt LWR fuel in LWR reactors*) [38-40].



Gambar 17: Konsep DUPIC untuk daur ulang sisa BBN



Gambar 18: Skenario SUPEL untuk daur ulang sisa BBN

3.3.5. Thorium dan MSR

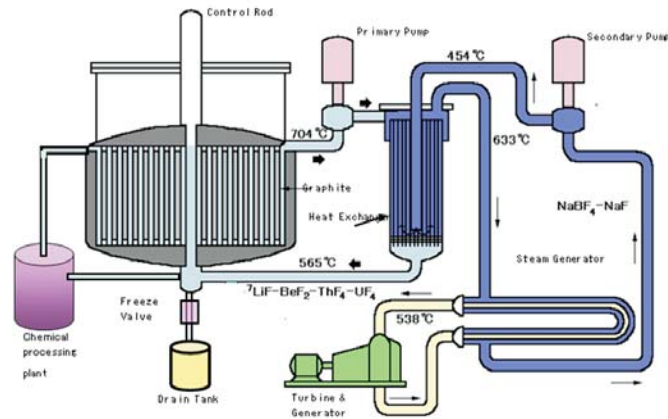
Selain uranium, thorium juga dapat berfungsi sebagai sumber bahan bakar bagi PLTN. Deposit thorium dalam kerak bumi telah diprediksi mencapai 3-4 kali lebih banyak dibandingkan uranium. Pemanfaatan thorium sebagai bahan bakar nuklir akan memperpanjang rentang waktu pemanfaatan energi nuklir hingga mencapai jutaan tahun. Disamping itu thorium akan menghasilkan sedikit sekali limbah nuklir yang berbahaya karena yang dominan hanya produk fisi. Dengan demikian studi tentang pemanfaatan thorium sebagai bahan bakar nuklir merupakan riset yang menarik dan memiliki prospek yang menjanjikan. Beberapa negara seperti India dan China memiliki program nuklir yang khusus terkait pemanfaatan thorium sebagai bahan bakar nuklir.

Penelitian tentang daur ulang sisa BBN berbasis uranium dalam beberapa jenis reaktor nuklir dengan bahan bakar thorium telah juga penulis lakukan [41-43].

Pada tahun 2001 sebuah organisasi kerjasama internasional didirikan dengan nama Generation IV International Forum (GIF) untuk melakukan penelitian dan pengembangan yang diperlukan untuk merealisasi sistem energi nuklir generasi baru, yang disebut Generasi IV (Gen-IV), yang diharapkan mulai beroperasi tahun 2030. GIF telah memilih 6 sistem reaktor nuklir baru untuk Generasi IV, yaitu GFR (*Gas-Cooled Fast Reactor System*), LFR (*Lead-Cooled Fast Reactor System*), MSR (*Molten Salt Reactor System*), SFR (*Sodium-Cooled Fast Reactor System*), SWCR (*Supercritical-Water-Cooled Reactor System*), VHTR (*Very-High-Temperature Reactor System*).

Dari 6 sistem reaktor Gen-IV hanya MSR yang secara inheren menggunakan thorium sebagai bahan bakar utama. Disamping itu, MSR merupakan satu-satunya reaktor dengan bahan bakar cair. MSR memiliki beberapa kelebihan antara lain: *safety improvement* karena tekanan operasi rendah (~4 atm), *proliferation resistance* karena menghasilkan jauh lebih sedikit limbah nuklir, *resource sustainability* karena memanfaatkan secara langsung thorium yang 3-4 kali lebih banyak di alam dibanding uranium, dapat dapat membakar limbah sendiri, serta dapat digunakan untuk produksi gas hidrogen karena beroperasi pada suhu tinggi (>600 °C).

Gambar 19 menunjukkan diagram skematik dari MSR [44]. Karena thorium bukan material fisil, maka untuk memulai operasi MSR diperlukan material fisil ^{233}U . ^{233}U sendiri tidak ada di alam, tetapi dapat dihasilkan dalam MSR. Sebagai pengganti ^{233}U , beberapa desain MSR menggunakan Pu atau ^{235}U .



Gambar 19: Diagram skematik MSR

Penulis telah melakukan beberapa penelitian terkait dengan pemanfaatan Pu dan MA dalam MSR [45-47]. Dari penelitian ini, salah satu kesimpulan penting adalah MSR dapat digunakan untuk membakar limbah nuklir dengan sangat efektif, termasuk Pu dari hulu ledak balistik nuklir. Karena penelitian tentang MSR merupakan ide lama yang dimunculkan kembali, maka peluang untuk melakukan kolaborasi internasional terbuka lebar. Salah satu berkah dari penelitian ini adalah penulis diundang untuk menjadi anggota ITMSF (*Internasional Thorium Molten Salt Forum*) dan menjadi anggota *Working Group on MSR Technology* di IAEA (*International Atomic Energy Agency*). In syaa Allah, pada bulan April 2017, akan diterbitkan oleh Elsevier Inc., USA sebuah buku yang ditulis bersama oleh sejumlah peneliti dari berbagai negara berjudul "*Molten Salt Reactors*". Salah satu bab dari buku tersebut berisi aktivitas penelitian MSR di Indonesia yang dirangkum oleh penulis.

4. PENUTUP

Sumber energi nuklir memiliki densitas energy yang sangat besar dibandingkan sumber energy konvensional seperti minyak bumi dan batubara. Sebagai sumber energi bebas emisi gas rumah kaca, energi nuklir sering dikaitkan dengan isu keselamatan, proliferasi, dan masalah limbah nuklir.

Terkait dengan limbah nuklir, ada 2 opsi yaitu OTC dan *Reprocessing* dengan beberapa metode yang dapat dilakukan untuk masing-masing opsi. Dalam tulisan ini telah dijelaskan beberapa metode yang terkait dengan opsi *reprocessing*. Masih banyak penelitian dan pengembangan

yang dapat dilakukan untuk mencapai keadaan *zero release nuclear waste*. Diantaranya adalah menyediakan perpustakaan data nuklir yang membutuhkan *nuclear physicists*. Disamping itu, penggunaan thorium dalam reaktor Gen-IV sangat menjanjikan untuk mengurangi jumlah limbah nuklir. R & D untuk mewujudkan hal yang terakhir ini perlu dilakukan secara lebih intensif.

5. RENCANA KE DEPAN

Rencana ke depan yang akan dilakukan adalah meneruskan kegiatan penelitian yang sudah dirintis saat ini, yaitu:

- ▶ Daur ulang limbah nuklir pada reaktor daya nuklir yang sedang beroperasi di dunia saat ini (PWR, BWR, dan CANDU)
- ▶ Daur ulang limbah nuklir pada reaktor daya nuklir Gen-IV (MSR dan VHTR)
- ▶ Menyiapkan perpustakaan data nuklir untuk menunjang kegiatan R & D metode daur ulang limbah nuklir, khususnya LLPP dan MA.

UCAPAN TERIMA KASIH

Pertama-tama saya memanjatkan puji syukur kehadirat Allah SWT atas segala nikmat dan karunia yang telah dilimpahkan hingga saat ini, khususnya pencapaian jabatan akademik tetinggi.

Pada hari yang berbahagia ini, perkenankanlah saya menyampaikan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada yang terhormat Rektor dan Pimpinan ITB, Pimpinan dan seluruh Anggota

Forum Guru Besar ITB, atas kesempatan yang diberikan kepada saya untuk menyampaikan orasi ilmiah di hadapan para hadirin yang terhormat pada forum yang terhormat ini.

Ucapan terima kasih yang tak terhingga kepada Ayahanda tercinta Abidin (Alm) dan Ibunda tercinta Hj. Hafsah H. Ibrahim, yang telah membesarkan, memberikan pendidikan terbaik dengan penuh kesabaran, serta selalu mendoakan anak-anaknya dalam setiap akhir sholatnya.

Terima kasih yang tak terhingga juga disampaikan kepada Kakenda H. Ibrahim H. Karim (Alm) dan Nenenda Hj. Siti Aminah H. Hasan (Almh), serta 5 Pamanda tercinta (H. M. Yacub Mansyur (Alm), H. Abubakar Mahmud, H. Abdullah Yusuf, H. Abdullah Djafar, dan H. Sukrin H. Djafar) dan 6 Bibinda tercinta (Hj. Imo, Hj. Hadijah, Sulaiha (Almh), Hj. Fatimah, Hj. Zaenab, dan Hj. Hatijah) yang selalu bahu-membahu bersama Ayahanda dan Ibunda melakukan yang terbaik demi membiayai pendidikan bagi seluruh cucu-cucu tercinta dan anak-anak tercinta.

Ucapan terima kasih yang tak terhingga kepada Bapak Mertua H. A. Karim H. Hasan dan Ibu Mertua Hj. Siti Kamuriah, yang selalu memberikan dorongan dan doanya.

Terima kasih dan cinta serta permohonan maaf yang sebesar-besarnya untuk Istriku tercinta Emmy Mariana dan 6 anakku tersayang Shufaira, Humaira, Syauqi, Huwaida, Silmi dan Syamil yang bagaikan oase yang selalu memberikan kesejukan dan inspirasi dalam hidup saya. Abi mohon maaf karena telah banyak mengambil hak-hak berkumpul dengan kalian.

Terima yang tulus juga disampaikan kepada kakanda tercinta Suryani serta seluruh adinda tercinta (Nurhidayat, Ilham, Sri Mulyati, Rahmad, Sulaimansyah, Syarifudin, Amirudin, Ibrahim, Aminah, Aisyah, Nila, Mala, Wati, Tri, Edy, Titin, Eka, Dwi, dan Rian) atas dukungan dan doanya.

Terima kasih yang tulus dan penghargaan yang tinggi disampaikan kepada Dr. Sutrisno selaku pembimbing S1 di Fisika ITB dan Prof. Hiroshi Sekimoto (Tokyo Institute of Technology) selaku pembimbing S2 & S3, yang memberikan pondasi dalam riset ini.

Terima kasih yang tulus dan penghargaan yang tinggi disampaikan kepada yang terhormat Dekan, Dekanat, Kaprodi dan Ketua KK di FMIPA ITB, para sesepuh, para senior, dan seluruh kolega, serta seluruh tenaga kependidikan di FMIPA ITB.

Terima kasih yang tulus dan penghargaan yang tinggi disampaikan kepada yang terhormat para sesepuh, para guru, para senior di Fisika FMIPA ITB: Prof. Barmawi (Alm), Prof. Marsongko Hadi (Alm), Prof. Waloejo Loeksmanto (Alm), Prof. Sukirno (Alm), Prof. Hariadi P. Soepangkat, Prof. Tjia May On, Prof. P. Silaban, Prof. The How Liong, Prof. B. Suprpto, Prof. Lilik Hendrajaya, Prof. Doddy Sutarno, Dr. Ing. Suparno Satira, Prof. Mitra Djamal, Prof. Freddy P. Zen, Prof. Toto Winata, Prof. Zaki Suúd, Prof. Idam Arif, Prof. Triyanta, Prof. Umar Fauzi, dan Prof. Khairurrijal.

Terima kasih yang tulus dan penghargaan yang tinggi disampaikan kepada Kaprodi, seluruh kolega, serta seluruh tenaga kependidikan di Fisika FMIPA ITB.

Terima kasih yang tulus dan penghargaan yang tinggi disampaikan kepada anggota KK Fisika Nuklir dan Biofisika FMIPA ITB.

Terima kasih yang tulus dan penghargaan yang tinggi disampaikan kepada teman seperjuangan dari Bima NTB, Prof. Mikrajuddin Abdullah atas motivasi dan dukungannya.

Terima kasih yang tulus dan penghargaan yang tinggi juga disampaikan kepada guru, senior dan kolega yang banyak memberikan inspirasi dalam menjalankan tugas: Dr. Pepen Arifin, Dr. Widayani, Dr. Siti Nurul Khotimah, Dr. Euis Sustini, Dr. Neny Kurniasih, Dr. Suprijadi, Dr. R. Bagus Endar B, Dr. Novitrian, Dr. Khairul Basar, Dr. Rizal Kurniadi, Dr. Sparisoma, Dr. Alexander Iskandar, Dr. Wahyu Srigutomo, Prof. Bobby Eka Gunara, Prof. Satria Bijaksana, dll.

Terima kasih yang tulus dan penghargaan disampaikan kepada seluruh mahasiswa bimbingan S1, S2 dan S3. Apa yang tertulis dalam naskah orasi ini adalah bagian dari hasil kerja keras dan tulus kalian semuanya.

Terima kasih yang tulus dan penghargaan yang tinggi juga disampaikan semua pihak yang selalu membantu dan mendoakan saya yang tidak bisa disebutkan satu per satu dalam buku kecil ini.

Semoga Allah SWT senantiasa membalas segala amal ibadah Bapak/Ibu/Saudara sekalian dengan pahala yang tak terhingga seperi pahala buat orang yang bersabar. Aamiin Ya Rabbal Aalamiin

DAFTAR PUSTAKA

- [1] "March 11th tsunami a record 40.5 metres high NHK". nhk.or.jp. 13 August 2011. Archived from the original on 28 July 2011. Retrieved 7 September 2011.
- [2] Roland Buerk (11 March 2011). "Japan earthquake: Tsunami hits north-east". BBC. Archived from the original on 11 March 2011. Retrieved 12 March 2011.
- [3] http://www.rsc.org/images/essay1_tcm18-17763.pdf
- [4] <http://oregonstate.edu/instruct/ch374/ch418518/Chapter%2010%20NUCLEAR%20REACTIONS.pdf>
- [5] <http://www.nuclear-power.net/notation-nuclear-reactions/>
- [6] Alan E. Waltar, *America the Powerless, Facing our Nuclear Energy dilemma*, Cogito Book, Madison, Wisconsin, USA, 1995
- [7] A. E. Waltar, Proceeding GLOBAL 1997, Vol. 1, pp. 8, Mito, Japan, 1997
- [8] A. Waris and H. Sekimoto, Characteristics of several equilibrium fuel cycles of PWR, J. Nucl. Sci. and Technol., 38, 7, pp 517-526, 2001.
- [11] <http://www.nuclear-power.net/nuclear-power-plant/>, last accessed in Feb 2017
- [12] <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/students/animated-pwr.html>, last accessed in Feb 2017
- [13] R. G. Cochran and N. Tsoulfanidis, "The Nuclear Fuel Cycle: Analysis and Management", ANS, 1999

- [14] P.D. Wilson, "The Nuclear Fuel Cycle: From Ore to Waste", Oxford, 2001
- [15] <http://www.fornuclear.org/es/ask-the-expert/120711-stages-needed-to-obtain-nuclear-fuel-from-uranium>, last accessed in march 2017
- [16] https://www.iaea.org/About/Policy/GC/GC51/GC51InfDocuments/English/gc51inf-3-att5_en.pdf, last accessed in march 2017
- [17] Stacey, Weston M. *Nuclear Reactor Physics*. John Wiley & Sons. p. 240. ISBN 9783527406791, (2007)
- [18] National Academy of Science, *Nuclear Wastes: Technologies for Separations and Transmutation*. National Academies Press. ISBN 978-0-309-05226-9, 1996
- [19] C. Ganguly, Roles of partitioning and transmutation in the mitigation of the potential environmental impacts of nuclear fuel cycle, ICTP Workshop, 20-24 November 2006, Trieste, Italy
- [20] J. Ahn and M.J. Apted, *Geological Repository Systems for Safe Disposal of Spent Nuclear Fuels and Radioactive Waste*, Woodhead Publishing Limited, 2010
- [21] <https://www.nei.org/Issues-Policy/Used-Nuclear-Fuel-Management/Disposal-Yucca-Mountain-Repository>, last accessed in march 2017
- [22] G. E. Hansen and H. C. Paxton, *A Critical Assembly of Uranium Enriched to 10% in Uranium-235*, Nucl. Sci. Eng., 72, 230, 1979.
- [23] L Koch, Roles of partitioning and transmutation in the mitigation of the potential environmental impacts of nuclear fuel cycle, ICTP

Workshop, 20-24 November 2006, Trieste, Italy, 2006

- [24] H. Sekimoto and N. Takagi, *J. Nucl. Sci. Technol.*, 28, 941, 1991
- [25] A. Waris and H. Sekimoto, *Basic Study on Characteristics of Some Important Equilibrium Fuel Cycles of PWR*, *Ann. Nucl. Energy*, 28, 153, 2001
- [26] M Salvatores, I. Slessarev, A. Tchistiakov, *Analysis of Nuclear Power Transmutation Potential at Equilibrium*, *Nuclear Science and Engineering*, 124,2, pp. 280-290, 1996
- [27] A. Waris and H. Sekimoto, *Plutonium and Minor Actinides Recycle in Equilibrium Fuel Cycles of Pressurized Water Reactor*, *Proc. International Conference, GLOBAL 2001*, Paris, France, September 9-13, 2001
- [28] H. Sekimoto and A. Waris, *Influence of Moderation Ratio on Several Equilibrium Fuel Cycles of PWR*, *Trans. American Nuclear Society*, 86, 301-302, 2002
- [29] A. Waris, Z. Su'ud, S. Permana, H. Sekimoto, *Influence of void fraction change on plutonium and minor actinides recycling in BWR with equilibrium burnup*, *Progress in Nuclear Energy* 50, 295-298, 2008
- [30] A. Waris, et. al., *Study of Transuranium Recycling in PWR with 3-D Burnup Analysis using SRAC-COREBN Code*, *Indonesian Journal of Physics*, Vo. 20, No. 4, October 2009, pp. 95-98.
- [31] www.ndc.jaea.go.jp/cgi-bin/FPYfig, last accessed in march 2017
- [32] IAEA, *Status of Accelerator Driven Systems Research and Technology Development*, IAEA TECDOC No. 1766, 2015

- [33] Yudha Satya Perkasa, Rizal Kurniadi, Abdul Waris, *Application of TALYS code for Calculation of Fission Cross Section and Fission Yield of Several Heavy Nuclides*, *Indonesian Journal of Physics*, Vo. 20, No. 3, July 2009, pp. 49-53.
- [34] Yudha Satya Perkasa, Abdul Waris, Rizal Kurniadi, and Zaki Su'ud, *Prediction of ^{nat}Pb and ^{209}Bi neutron induced fission cross section using TALYS for energy up to 200 MeV*, *AIP Conf. Proc.* 1448, pp. 283-290, 2012
- [35] Yudha Satya Perkasa, Abdul Waris, Rizal Kurniadi, and Zaki Su'ud, *Calculation of fission yield using fission barrier from optimal shapes of liquid drop model*, *AIP Conf. Proc.* 1448, pp. 297-306, 2012
- [36] Y S Perkasa, A Waris, Rizal Kurniadi, Zaki Su'ud, *Implementation of New Fission Barrier Model in TALYS Code*, *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 110-116 (2012) pp 2475-2480
- [37] C. J. Park, et. al., *Irradiation tests and post-irradiation examinations of DUPIC fuel*, *Annals of Nuclear Energy*, 35, pp. 1805-1812, 2008
- [38] A. Waris, et.al., *Preliminary study on direct recycling of spent BWR fuel in BWR system*, *AIP Conf. Proc.* 1454, pp. 73-76, 2012
- [39] A. Waris, et.al., *SUPEL Scenario for PWR Spent Fuel Direct Recycling Scheme*, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 575, pp. 653-657, 2014
- [40] A. Waris, et.al., *Influence of void fraction on BWR spent fuel direct recycling scenario*, *International Journal of Hydrogen Energy*, 40, pp. 15172-15178, 2015
- [41] A. Waris, et.al., *Comparative Studies on Thorium Fuel Cycles of BWR with*

JENDL 3.2 and JEF 2.2 Data Libraries, International Journal on Nuclear Energy Science and Technology, Vol. 8, No. 1, pp.1-11, 2014

[42] A. Waris, et.al., "Effect of void-fraction on characteristics of several thorium fuel cycles in BWR", Energy Conversion Management, 63, pp.11-16, 2012

[43] A. Waris, et.al., *Study on Equilibrium Characteristics of Thorium-Plutonium-Minor Actinides Mixed Oxides Fuel in PWR*, Presented at ICANSE 2-3 November 2009, published in AIP Conference Proceeding Vol 1244, pp. 85-90, 2010

[44] D. LeBlanc, Molten Salt Reactor: A New Beginning for an Old Idea, Nuclear Engineering & Design, Vol. 240, pp. 1644-1656, 2010

[45] A Waris, Indarta K Aji, S Pramuditya, S Permana, Z Su'ud, *Comparative Studies on Plutonium and Minor Actinides Utilization in Small Molten Salt Reactors with Various Powers and Core Sizes*, Energy Procedia, 71, pp. 62-68, 2015

[46] Abdul Waris, Very Richardina, Indarta Kuncoro Aji, Sidik Permana, and Zaki Su'ud, *Preliminary study on plutonium and minor actinides utilization in thorims-nes minifuji reactor*, Energy Conversion Management, 72, pp.27-32, 2013

[47] Abdul Waris, Indarta Kuncoro Aji, Yanti Yulianti, Muhamad Ali Shafii, Imam Taufiq, Zaki Suud, *Comparative Study on 233U and Plutonium Utilization in Molten Salt Reactor*, Indonesian Journal of Physics, Vo. 21, No. 3, pp.77-81, 2010

CURRICULUM VITAE



Nama : **ABDUL WARIS**

Tempat/tgl lahir : Bima, 24 September 1967

Kel. Keahlian : Fisika Nuklir dan Biofisika

Alamat Kantor : Jalan Ganesha 10 Bandung

Nama Istri : Emmy Mariana

Nama Anak : 1. Shufaira Iswariani Abidin
2. Humaira Marwa Abidin
3. Syauqi Muzakki Abidin
4. Huwaida Badia Abidin
5. Silmi Mujahid Abidin
6. Syamil Maulana Abidin

I. RIWAYAT PENDIDIKAN

- Doctor of Philosophy (Ph.D.), Nuclear Engineering, Tokyo Institute of Technology, Japan, 2002
- Master of Engineering (M.Eng.), Nuclear Engineering, Tokyo Institute of Technology, Japan, 1999
- Sarjana Fisika (Drs), Institut Teknologi Bandung (ITB), 1992

II. RIWAYAT KERJA di ITB

- Staf Pengajar Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, 1994 - Sekarang
- Ketua Program Studi Magister & Doktor Fisika, 2008-2009
- Ketua Program Studi Magister Pengajaran Fisika, 2008-2008
- Ketua Program Studi Sarjana Fisika, 2010-2011

- Anggota Senat FMIPA 2013-2015
- Anggota Senat Akademik ITB 2014-2015
- Wakil Dekan Bidang Akademik FMIPA, 2015 - Sekarang

III. RIWAYAT KEPANGKATAN

- CPNS, 1 Maret 1994
- Penata, III/c, 1 Mei 2004
- Penata Tk 1, III/d, 1 Mei 2006
- Pembina, IV/a, 1 Oktober 2010
- Pembina Tk 1, IV/b, 1 Oktober 2012
- Pembina Utama Muda, IV/c, 1 Oktober 2015

IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

- Lektor, 1 April 2004
- Lektor Kepala, 1 Mei 2010
- Profesor/Guru Besar, 1 Desember 2014

V. KEGIATAN PENELITIAN

- Hibah FMIPA ITB: 2002-2003
- Hibah Bersaing XII/1 DP2M Dikti: 2004-2005
- RUT XI/1: 2004-2005
- Riset ITB: 2005-2017
- Insentif Riset Dasar KNRT: 2007-2009
- Hibah Kompetensi Dikti: 2008-2010
- Hibah Strategis Nasional: 2009
- Riset Asahi Glass: 2012-2014

- Hibah Kompetensi Dikti: 2012-2014
- Riset IA-ITB: 2013-2014
- Riset IA-ITB: 2015-2016
- Riset Asahi Glass: 2016-2017

VI. PUBLIKASI (7 TAHUN TERAKHIR)

1. Waris, A., Prastyo, P.A., Pramuditya, S., Irwanto, D., Sekimoto, H., Comparative studies on plutonium utilization in HTTR with helium and carbon dioxide gas coolants, International Journal of Hydrogen Energy, 41 (17), 2016, pp. 6984-6989
2. S Permana, A Waris, Z Suud, H Sekimoto, Void reactivity aspect and fuel conversion potential of heavy water cooled thorium reactor, International Journal of Energy Research, In Publication process, 2016, <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/er.3594/epdf>
3. Kurniadi, R., Waris, A., Viridi, S., Monte Carlo simulation based toy model for fission process, International Journal of Modern Physics C, 27 (3), 2016, 1650030
4. Nurul Subkhi, M., Su'ud, Z., Waris, A., Permana, S., Design concept of small long-life PWR using square and hexagonal thorium fuel, ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 11 (2), 2016, pp. 830-832.
5. Waris, A., Su'ud, Z., Sahin, H.M., Kurt, E., Sahin, S., Influence of void fraction on BWR spent fuel direct recycling scenario, International Journal of Hydrogen Energy, 40, 2015, pp. 15172-15178
6. A Waris, Indarta K Aji, S Pramuditya, S Permana, Z Su'ud,

- Comparative Studies on Plutonium and Minor Actinides Utilization in Small Molten Salt Reactors with Various Powers and Core Sizes, *Energy Procedia*, 71, 62-68, 2015.
7. MN Subkhi, Z Suud, A Waris, S Permana, Optimization of small long-life PWR based on thorium fuel, The 5th International Conference on Mathematics and Natural Sciences 2014 (ICMNS 2014), 1677, 120001, AIP Publishing, 2015.
 8. I K Aji, A Waris, S Permana, Analysis of fluid fuel flow to the neutron kinetics on molten salt reactor FUJI-12, The 5th International Conference on Mathematics and Natural Sciences 2014 (ICMNS 2014), 1677, 120012, AIP Publishing, 2015
 9. N Trianti, Z Su'ud, I Arif, S Permana, Thermal hydraulic calculation for boiling water reactor and its natural circulation component, The 5th International Conference on Mathematics and Natural Sciences 2014 (ICMNS 2014), 1677, 120003, AIP Publishing, 2015
 10. MN Subkhi, Z Suud, A Waris, S Permana, Studi Desain Reaktor Air Bertekanan (PWR) Berukuran Kecil Berumur Panjang Berbahan Bakar Thorium, *JURNAL ISTEK* 9 (1), 2015
 11. Anis Rohanda and Abdul Waris, Analysis of N-16 Concentration in Primary Cooling System of AP1000 Power Reactor, The 5th Asian Physics Symposium (APS 2012), AIP Conf. Proc. 1656, 2015, 060012-1–060012-5; doi: 10.1063/1.4917143
 12. MN Subkhi, Z Su'ud, A Waris, S Permana, Conceptual design study of small long-life PWR based on thorium cycle fuel, The 4th International Conference on Advances in Nuclear Science and Engineering 2013 (ICANSE 2013), AIP Conference

- Proceedings, 1615, 61-64, 2014
13. Abdul Waris, Syeilendra Pramuditya, Indarta Kuncoro Aji, Rahadi Wirawan, Nuha, SUPEL Scenario for PWR Spent Fuel Direct Recycling Scheme, *Applied Mechanics and Materials*, Volume 575, June 2014, Pages 653-657,
 14. Abdul Waris, Syeilendra Pramudhitya, Yudha Satya Perkasa, Idam Arif, Comparative Studies on Thorium Fuel Cycles of BWR with JENDL 3.2 and JEF 2.2 Data Libraries, *International Journal on Nuclear Energy Science and Technology (IJNEST)*, Vol. 8, No. 1, 2014, pp.1-11
 15. Monado, F., Ariani, M., Su'ud, Z., Waris, A., Basar, K., Aziz, F., Permana, S., Sekimoto, H, Conceptual design study on very small long-life gas cooled fast reactor using metallic natural Uranium-Zr as fuel cycle input, AIP Conference Proceeding Volume 1584, 2014, Pages 105-108
 16. Wirawan, R. , Djamal, M., Waris, A. , Handayani, G., Kim, H.J., Investigation of incoherent gamma-ray scattering potential for the fluid density measurement , *Applied Mechanics and Materials*, Volume 575, 2014, Pages 549-553
 17. Indarta Kuncoro Aji and Abdul Waris, Preliminary study on weapon grade uranium utilization in molten salt reactor miniFUJI, AIP Conference Proceedings, Vol. 1615, 2014, pp. 57-60
 18. Y. S. Perkasa, A. Waris, R. Kurniadi, and Z. Su'ud, Study of Asymmetric Fission Yield Behavior from Neutron Deficient Hg Isotope, AIP Conference Proceedings, Vol. 1615, 2014, pp. 96-100
 19. Y. S. Perkasa, A. Waris, R. Kurniadi, and Z. Su'ud, Comparative Studies of Actinide and Sub-Actinide Fission Cross Section

Calculation from MCNP6 and TALYS, AIP Conference Proceedings, Vol. 1615, 2014, pp. 128-132

20. Abdul Waris, Very Richardina, Indarta Kuncoro Aji, Sidik Permana, and Zaki Su'ud, Preliminary study on plutonium and minor actinides utilization in thorims-nes minifuji reactor, Energy Conversion Management, 72, 2013, pp.27-32.
21. Sidik Permana, Mitsutoshi Suzuki, Masaki Saito, Novitrian, Abdul Waris, Zaki Suud, Study on material attractiveness aspect of spent nuclear fuel of LWR and FBR cycles based on isotopic plutonium production, Energy Conversion Management, 72, 2013, pp.19-26.
22. Sugiharto, Zdzislaw Stegowski, Leszek Furman, Zaki Su'ud, Rizal Kurniadi, Abdul Waris, Zainal Abidin, "Dispersion determination in a turbulent pipe flow using radiotracer data and CFD analysis", Computers & Fluids, 79, 2013, pp.77-81.
23. Menik Ariani, Z. Su'ud, Fiber Monado, A. Waris, Khairurrijal, I. Arif, Ferhat A, and H. Sekimoto, "Optimization of Small Long Life Gas Cooled Fast Reactors With Natural Uranium as Fuel Cycle Input", Applied Mechanics and Materials Vols. 260-261 (2013) pp 307-311
24. Fiber Monado, Zaki Su'ud, Abdul Waris, Khairul Basar, Menik Ariani, and Hiroshi Sekimoto, "Application of Modified CANDLE Burnup to Very Small Long Life Gas-cooled Fast Reactor", Advanced Materials Research Vol. 772 (2013) pp 501-506.
25. Sidik Permana, Novitrian, Abdul Waris, Zaki Suud, Ismail, and Mitsutoshi Suzuki, "Analysis on Even Mass Plutonium Production of Different Loading Materials in FBR Blanket", Advanced

Materials Research Vol. 772 (2013) pp 507-512

26. Sidik Permana, Novitrian, Abdul Waris, Zaki Suud, Ismail, and Mitsutoshi Suzuki, "Irradiation and Cooling Process Effects on Material Barrier Analysis Based on Plutonium Composition of LWR", Advanced Materials Research Vol. 772 (2013) pp 513-518
27. Novitrian, Abdul Waris, Sparisoma Viridi, and Zaki Suud, "Preliminary Study of Safety Analysis of Pb-Bi Cooled Small Power Reactor with Natural Circulation", Advanced Materials Research Vol. 772 (2013) pp 519-523.
28. M Nurul Subkhi, Zaki Su'ud, and Abdul Waris, "Neutronic Design of Small Long-Life PWR using Thorium Cycle", Advanced Materials Research Vol. 772 (2013) pp 524-529.
29. R. Wirawan, M. Djamal, A. Waris, G. Handayani, and H.J. Kim, "Response Function of Collimated Detector for Non Axial Detector-Source Geometry", Advanced Materials Research Vol. 772 (2013) pp 571-578
30. Abdul Waris, Mohamad Ali Shafii, Syeilendra Pramuditya, Rizal Kurniadi, Novitrian, Zaki Su'ud, "Effect of void-fraction on characteristics of several thorium fuel cycles in BWR", Energy Conversion Management (ECM), 63, 2012, pp.11-16
31. Mohamad Ali Shafii, Zaki Su'ud, Abdul Waris, Neny Kurniasih, Nuclear Fuel Cell Calculation Using Collision Probability Method with Linear Non Flat Flux Approach, World Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.2, No.2, 2012, pp. 49-53
32. Y S Perkasa, A Waris, Rizal Kurniadi, Zaki Su'ud, Implementation of New Fission Barrier Model in TALYS Code, Applied Mechanics

and Materials, Vols. 110-116 (2012) pp 2475-2480

33. A. Waris, Sumbono, Dythia Prayudhatama, Novitrian, and Zaki Su'ud, Preliminary study on direct recycling of spent BWR fuel in BWR system, AIP Conf. Proc. 1454, pp.73-76, 2012
34. R. Surbakti, A. Waris, K. Basar, S. Permana, and R. Kurniadi, Influence of void fraction on plutonium recycling in BWR, AIP Conf. Proc. 1454, pp.77-80, 2012
35. M. Ariani, Z. Su'ud, A. Waris, Khairurrijal, F. Manado, Design of small gas cooled fast reactor with two region of natural Uranium fuel fraction, AIP Conf. Proc. 1454, pp. 69-72, 2012
36. Abdul Waris, Nuha, Novitrian, Rizal Kurniadi, and Zaki Su'ud, Preliminary study on direct recycling of spent PWR fuel in PWR system, AIP Conf. Proc. 1448, pp. 135-141, 2012
37. Abdul Waris, Indarta K. Aji, Novitrian, Rizal Kurniadi, and Zaki Su'ud, Plutonium and minor actinides utilization in Thorium molten salt reactor, AIP Conf. Proc. 1448, pp. 115-118, 2012
38. M. Ariani, Z. Su'ud, A. Waris, Khairurrijal, F. Monado, F. Fahmi, H Sekimoto, The feasibility study of small long-life gas cooled fast reactor with mixed natural Uranium/Thorium as fuel cycle input, AIP Conf. Proc. 1448, pp. 59-64, 2012
39. R. Kurniadi, YS. Perkasa, A. Waris, Neck curve polynomials in neck rupture model, AIP Conf. Proc. 1448, pp. 291-296, 2012
40. Yudha Satya Perkasa, Abdul Waris, Rizal Kurniadi, and Zaki Su'ud, Prediction of natPb and ²⁰⁹Bi neutron induced fission cross section using TALYS for energy up to 200 MeV, AIP Conf. Proc. 1448, pp. 283-290, 2012

41. Yudha Satya Perkasa, Abdul Waris, Rizal Kurniadi, and Zaki Su'ud, Calculation of fission yield using fission barrier from optimal shapes of liquid drop model, AIP Conf. Proc. 1448, pp. 297-306, 2012
42. S. Viridi, R. Kurniadi, A. Waris, and Y. S. Perkasa, A classical approach in simple nuclear fusion reaction $1H_2 + 1H_3$ using two-dimension granular molecular dynamics model, AIP Conf. Proc. 1448, pp. 170-176, 2012
43. Z. Su'ud, M. A. Shafii, S. P. Yudha, A. Waris, and K. Rijal, Preliminary development of thermal nuclear cell homogenization code, AIP Conf. Proc. 1448, pp. 202-208, 2012
44. Novitrian, Z. Su'ud, and A. Waris, Thermal hydraulic analysis of advanced Pb-Bi cooled NPP using natural Circulation, AIP Conf. Proc. 1448, pp. 275-280, 2012
45. M. N. Subkhi, Z. Su'ud, A. Waris, Design study of long-life PWR using thorium cycle, AIP Conf. Proc. 1448, pp. 101-106, 2012
46. Siti Nurul Khotimah, Sparisoma Viridi, Widayani Sutrisno, Abdul Waris, "Energy of One-Dimensional Diatomic Elastic Granular Gas: Theory and Molecular Dynamics Simulation", Indonesian Journal of Physics, Vol. 22, No. 3, July 2011, pp. 103-106
47. Y. Yulianti, Zaki Su'ud, A. Waris, S.N. Khotimah, Solving two-dimensional space-time dependent multi-group diffusion equations with SOR method, International Journal of Nuclear Science and Technology (IJNEST), Vol. 5, No. 4, 2010, pp. 310-320.
48. Y. Yulianti, Z. Su'ud, A. Waris, S.N. Khotimah, Iterative methods for solving space-time one dimensional multigroup diffusion

equations, International Journal of Nuclear Science and Technology (IJNEST), Vol. 5, No. 2, 2010, pp. 114-126.

49. Imam Taufiq, Zaki Suud, Abdul Waris, Mitra Djamal, Parallel Burnup Analysis of Long-life Fast Reactors Using Multi-core Programming, Indonesian Journal of Physics, Vo. 21, No. 1, January 2010, pp. 15-18.
50. Abdul Waris, Indarta Kuncoro Aji, Yanti Yulianti, Muhamad Ali Shafii, Imam Taufiq, Zaki Suud, Comparative Study on ²³³U and Plutonium Utilization in Molten Salt Reactor, Indonesian Journal of Physics, Vo. 21, No. 3, July 2010, pp. 77-81.
51. A. Waris, Z. Su'ud, R. Kurniadi, Novitrian, S. Permana, and H. Sekimoto, Study on plutonium and minor actinides utilization in high temperature engineering test reactor (HTTR), 3rd International Symposium on Nuclear Energy System (INES-3), 30 Oct–3 Nov 2010, Tokyo.
52. S. Permana, H. Sekimoto, A. Waris, M. N. Subhki, and Ismail: Fuel Breeding and Core Behavior Analyses on In Core Fuel Management of Water Cooled Thorium Reactors, AIP Conf Prof. 1325, 2010, pp. 229-232
53. Rijal Kurniadi, Y. S. Perkasa, and Abdul Waris "Computational Approach in Determination of ²³³U and ²³³Th Fermi Energy", AIP Conf. Proc. 1325, 2010, pp. 233-235
54. Y. S. Perkasa, A. Waris, and R. Kurniadi, Level Density Calculation Using Collective Enhanced Parameter on Several Deformed Light Nuclei, AIP Conf. Prof. 1325, 2010, pp. 236-239
55. Y. Yulianti, Z. Su'ud, A. Waris, S. N. Khotimah, and M. A. Shafii,

Fast Transient and Spatially Non-Homogenous Accident Analysis of Two-Dimensional Cylindrical Nuclear Reactor, AIP Conf. Proc. 1325, 2010, pp. 245-248

56. M. Ariani, Z. Su'ud, A. Waris, Khairurrijal, N. Asiah, and M. A. Shafii: Effect of Fuel Fraction on Small Modified Candle Burn-Up Based Gas Cooled Fast Reactors, AIP Conf. Proc. 1325, 2010, pp. 249-252
57. M. A. Shafii, Z. Su'ud, A. Waris, N. Kurniasih, M. Ariani, and Y. Yulianti: Neutron Flux Interpolation with Finite Element Method in the Nuclear Fuel Cell Calculation Using Collision Probability Method, AIP Conf. Proc. 1325, 2010, pp. 253-256
58. Sugiharto, Z. Su'ud, R. Kurniadi, A. Waris, and Z. Abidin: Analysis of Residence Time Distribution of Fluid Flow by Axial Dispersion Model, AIP Conf. Proc. 1325, 2010, pp. 257-260
59. Sidik Permana, Abdul Waris, Azizul Khakim and Deby Mardiansyah, Core Fuel Management Analysis on Breeding Capability of Water-Cooled Thorium Reactors, Proceeding of Indonesian Scientific Conference (ISC), Nagoya, Japan, 7 Augus, 2010, pp 49-50.

VII. PENGHARGAAN

- Tanda Jasa Penghargaan Pengabdian 10 Tahun
- Tanda Jasa Penghargaan Pengabdian 20 Tahun

VII. SERTIFIKASI

- Sertifikasi Prajabatan CPNS, 2014, Depdikbud
- Sertifikasi Dosen, 2010. Kementerian Pendidikan Nasional

