

**PENGARUH PENAMBAHAN PROTACTINIUM-231 PADA
TINGKAT KEKRITISAN REAKTOR AIR DIDIH BERBAHAN
BAKAR THORIUM**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Sains
Bidang Studi Fisika



Oleh:

RIZKY FATYAH

08021381419056

**JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
INDRALAYA
2018**

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH PENAMBAHAN PROTACTINIUM-231 PADA
TINGKAT KEKRITISAN REAKTOR AIR DIDIH BERBAHAN
BAKAR THORIUM**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Sains Bidang Studi Fisika

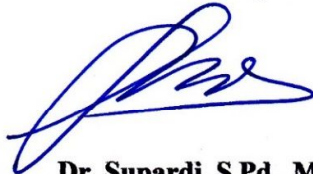
Oleh :

RIZKY FATYAH

NIM. 08021381419056

Indralaya, Juli 2018

Pembimbing II



Dr. Supardi, S.Pd., M.Si.

NIP. 197112112002121002

Pembimbing I



Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si.

NIP. 197211252000122001

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika



Dr. Fransyah Virgo, S.Si., M.T.

NIP. 197009101994121001

LEMBAR PERSEMBAHAN

“Selalu ada harapan bagi mereka yang sering berdoa, selalu ada jalan bagi mereka yang sering berusaha”

“Sungguh, kesukaran itu pasti ada kemudahan. Oleh karena itu, jika kamu telah selesai dari suatu tugas, kerjakanlah dengan yang sungguh-sungguh dan kepada Tuhanmulah hendaknya kau memohon dan mengharap”

-Q.s. Al-Insyirah:6:8-

With love, skripsi ini kupersembahkan kepada:

❖ **Kedua orang tua-ku**

(Ayah Zenal Arifin & Ibu Nurmaliah),

❖ **Saudara-ku**

(Irma Septiana, M. Iqbal Maulana, dan Suci Nur Islami),

❖ **Almamater-ku**

(Fisika FMIPA Universitas Sriwijaya),

❖ **Dan semua pihak yang telah membatu selama ini**

(Dosen & staf jurusan Fisika, teman, dan keluarga besar).

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT, karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini sebagai tugas akhir program sarjana strata satu. Penelitian ini berjudul **“Pengaruh Penambahan Protactinium-231 Pada Tingkat Kekritisasi Reaktor Air Didih Berbahan Bakar Thorium”** yang dilaksanakan di Laboratorium Fisika Komputasi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.

Dalam pelaksanaan tugas akhir dan penyusunan skripsi, penulis banyak mendapatkan bantuan dari semua pihak sehingga selesai dengan baik. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kepada kedua orang tua, dan saudaraku yang senantiasa mendoakan dan memberikan dukungan kepada saya.
2. Ibu Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing I dan Bapak Dr. Supardi, S.Pd. M.Si., selaku Dosen Pembimbing II yang senantiasa sabar memberikan waktunya untuk memberi arahan dan bantuan selama pelaksanaan tugas akhir dan penyusunan skripsi.
3. Bapak Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si., Bapak Drs. Oktavianus Cakra Satya, M.T., dan Bapak Drs. Hadir Kaban, M.T., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik dan saran.
4. Bapak Prof. Dr. Iskhaq Iskandar, M.Sc., selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
5. Bapak Dr. Frinsyah Virgo, S.Si., M.T., selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
6. Akmal Johan, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing Akademik.
7. Bapak, Ibu dosen dan staf administrasi Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.

8. Teman-teman KBI Elektronika, Instrumentasi, Komputasi dan Nuklir angkatan 2014; Abdurrahman, Ahmad Irawan, Anisa, Bambang, Elza, Fitri, Hartiwi, Novaldan, Natasha, Luthfia, Purwati, Septy.
9. Seluruh teman-teman Fisika angkatan 2014.
10. Teman-temanku; Aprilianda, Aulia, Dinda Ainun, Luthfia Indarani, Sindi Yulia, Taniya Syakirah, Wenny Valentina Sinambela.
11. Kepada semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan tugas akhir dan penyusunan skripsi yang tidak dapat disebutkan satu-persatu.

Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih banyak dan semoga skripsi ini bermanfaat bagi pembaca.

Indralaya, Juli 2018

Penulis,

Rizky Fatyah

PENGARUH PENAMBAHAN PROTACTINIUM-231 PADA TINGKAT KEKRITISAN REAKTOR AIR DIDIH BERBAHAN BAKAR THORIUM

Oleh:

RIZKY FATYAH

NIM. 08021381419056

ABSTRAK

Penelitian ini membahas pengaruh dari penambahan racun bakar yaitu protactinium pada bahan bakar berbasis thorium-uranium gabungan untuk BWR berumur panjang dengan daya termal 500MWt. Bahan bakar dalam penelitian ini terdiri dari ThO_2 dikombinasikan dengan 1,8-3% enrichment UO_2 . Untuk mencapai excess reactivity $<10\%$ pada awal pembakaran, dilakukan penambahan material Pa-231 sebanyak 1-5%. Pemilihan protactinium pada penelitian ini karena Protactinium-231 memiliki kemampuan menyerap neutron termal yang kuat. Di sisi lain Pa-231 dapat mengkompensasi isotop fisil pada langkah burnup selanjutnya. Pada penambahan Pa-231 sebanyak 3% didapatkan nilai kelebihan reaktivitas di awal pembakaran $<10\%$ sebesar 9,65. Periode refueling yang dicapai hanya 3 tahun, untuk memperpanjang masa refueling perlu diperbaiki dengan cara menambahkan kombinasi bahan bakar thorium dengan bahan bakar lain seperti plutonium agar periode refueling lebih panjang.

Kata kunci: BWR, Thorium, Burnable poison, Protactinium, Faktor multifikasi efektif.

EFFECT OF ADDITION OF PROTACTINIUM-231 IN THE LEVEL CRITICAL OF BOILING WATER REACTOR WITH THORIUM FUEL DESIGN

by:

RIZKY FATYAH

NIM. 08021381419056

ABSTRACT

This research discuss about effect of the addition of burnable poison on the fuel that is protactinium thorium-uranium-based combined for BWR longevity with thermal power 500MWt. The fuel in this study consisted of ThO₂ combined with 1.8-3% enrichment UO₂. To achieve excess reactivity <10% at the beginning of life, the addition of Pa-231 materials is 1-5%. Selection of protactinium in this study because Protactinium-231 has the ability to absorb strong thermal neutrons. On the other hand Pa-231 can compensate for fissile isotopes at the next burnup step. In the addition of Pa-231 as much as 3%, the value of excess reactivity at the beginning of burning <10% was 9.65. Refueling period were achieved just three years, to extend the refueling needs to be improved by adding a combination of thorium fuel with other fuels such as plutonium that longer periods of refueling.

Key words: BWR, Thorium, Burnable poison, Protactinium, *k-eff*.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
LEMBAR PERSEMBAHAN	iii
KATA PENGANTAR	vi
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
DAFTAR ISTILAH	xiii

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	3

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)	4
2.2 Reaktor Nuklir	5
2.3 Jenis-jenis Reaktor Nuklir	8
2.4 Reaktor Air Didih (<i>Boiling Water Reactor</i>)	8
2.5 Racun Bakar (<i>Burnable Poison</i>)	9
2.6 Analisis Neutronik	11
2.7 Reaksi Fisi	11
2.8 Penampang Lintang Reaksi Nuklir	12
2.9 Persamaan Difusi	13
2.10 Persamaan <i>Burnup</i>	14
2.11 Faktor Multifikasi	15

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat	17
3.2 Alat dan Bahan	17

3.3	Metode Penelitian	17
3.4	Langkah Kerja	18
3.5	Parameter dan Spesifikasi Bahan Bakar	19
3.6	Geometri Sel Bahan Bakar	20
3.7	Geometri Teras	21
3.8	Parameter Survei.....	21

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1	Hasil Perhitungan Sel Bahan Bakar	23
4.2	Analisis dan Hasil Perhitungan Sel Bahan Bakar	23
4.2.1	<i>Level Burnup</i>	23
4.2.2	Faktor Multifikasi Tak Hingga	24
4.2.5	Densitas Atom.....	25
4.2.6	<i>Conversion Ratio</i>	26
4.3	Hasil Perhitungan Teras Reaktor	27
4.3.1	Faktor Multifikasi Efektif	28

BAB V PENUTUP

5.1	Kesimpulan.....	31
5.2	Saran.....	31

DAFTAR PUSTAKA	32
-----------------------------	----

LAMPIRAN-LAMPIRAN	34
--------------------------------	----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Prinsip kerja PLTN.....	5
Gambar 2.2.	Rantai konversi dari thorium	7
Gambar 2.3.	Skema sistem <i>Boiling Water Reactor</i> (BWR)	9
Gambar 2.4.	Rantai konversi Protactinium	11
Gambar 2.5.	Reaksi fisi nuklir	12
Gambar 2.6.	Skema peluruhan tipe produksi.....	15
Gambar 2.7.	Faktor multifikasi neutron	16
Gambar 3.1.	Langkah kerja penelitian.....	18
Gambar 3.2.	Diagram alir perhitungan sel bahan bakar dan teras reaktor	19
Gambar 3.3.	Geometri sel bahan bakar	20
Gambar 3.4.	Geometri dan ukuran teras	21
Gambar 4.1.	Perubahan <i>Level Burnup</i> dalam jangka waktu 30 tahun.....	23
Gambar 4.2.	K-inf bahan bakar ThO ₂ dengan 3% U	24
Gambar 4.3.	Pengaruh ²³¹ Pa terhadap k-inf sepanjang buunup untuk persentase ²³³ U 3%	25
Gambar 4.4.	Perubahan densitas atom sepanjang waktu <i>burnup</i> dengan dan Tanpa Pa.....	26
Gambar 4.5.	<i>Conversion Ratio</i> selama 30 Tahun	27
Gambar 4.6.	Susunan Bahan Bakar dalam ½ teras reaktor	28
Gambar 4.7.	Perubahan k-eff terhadap siklus <i>burnup</i>	29

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Parameter dan spesifikasi desain BWR.....	19
Tabel 4.1. Persentase penambahan protactinim	22
Tabel 4.2. Rata-rata <i>level burnup</i> sel bahan bakar	23
Tabel 4.3. Variasi <i>enrichment</i> pada sel bahan bakar	28
Tabel 4.4. Nilai faktor mukltifikasi efektif.....	29
Tabel 4.5. Nilai <i>excess reactivity</i> (kelebihan reaktivitas).....	30

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. *Data Level Burnup*

Lampiran 2. *Input file* modul PIJ pada program SRAC untuk sel bahan bakar

Lampiran 3. *Output file* modul PIJ pada program SRAC untuk sel bahan bakar

Lampiran 4. *Input file* modul CITATION pada program SRAC untuk teras reaktor

Lampiran 5. *Output file* modul CITATION pada program SRAC untuk teras reaktor

DAFTAR ISTILAH

<i>Cladding</i>	: berupa kelongsong yang berfungsi sebagai pelindung bahan bakar dan pemisah bahan bakar dengan pendingin.
<i>Conversion ratio</i>	: perbandingan antara jumlah produksi atom fisil bahan bakar terhadap jumlah atom fisil bahan bakar yang dikonsumsi dalam reaktor.
Densitas atom	: populasi atom dalam setiap satuan volume.
<i>Enrichment</i>	: pengayaan, proses peningkatan konsentrasi isotop tertentu pada suatu materi.
<i>Excess reactivity</i>	: kelebihan reaktivitas.
Fisi	: reaksi pembelahan antara partikel neutron dengan inti atom yang disertai dengan pelepasan energi.
Fusi	: reaksi penggabungan antara partikel neutron dengan inti atom yang disertai dengan pelepasan energi.
<i>Fertile</i>	: suatu unsur/atom yang tidak dapat langsung membelah setelah menangkap neutron tetapi akan membentuk bahan fisil.
<i>Fissile</i>	: suatu unsur/atom yang langsung dapat membelah apabila menangkap neutron.
<i>Keff</i>	: konstanta yang digunakan untuk memantau populasi neutron dalam teras reaktor dengan memperhitungkan faktor kebocoran ke luar teras reaktor.
<i>Kinf</i>	: konstanta untuk mengetahui tingkat populasi neutron di dalam satu sel bahan bakar tanpa adanya faktor kebocoran ke luar teras reaktor.
<i>Level burnup</i>	: banyaknya energi yang dihasilkan persatuan berat bahan bakar dalam reaktor.
Moderator	: komponen reaktor yang digunakan untuk memperlambat laju neutron.

Neutronik	: segala sesuatu yang mencakup populasi neutron, distribusi neutron, energi neutron, kerapatan neutron, dan fluks neutron.
Penampang lintang	: probabilitas terjadinya suatu reaksi antara neutron dengan inti atom.
Reflektor	: bahan pemantul neutron.
σ	: penampang lintang mikroskopik.
Σ	: penampang lintang makroskopik.
K	: faktor multiplikasi.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi listrik semakin meningkat dari tahun ke tahun. Peningkatan yang terjadi disebabkan oleh laju pertumbuhan penduduk yang semakin bertambah, pertumbuhan ekonomi, dan pesatnya perkembangan sektor industri. Ini merupakan permasalahan besar bagi kelangsungan hidup manusia yang dihadapi oleh hampir seluruh warga di dunia.

Indonesia masuk dalam daftar 23 negara dengan konsumsi energi tertinggi di dunia. Daftar tersebut dikeluarkan oleh organisasi nirlaba Amerika Serikat (AS), *American Council for An Energy-Efficient Economy* (ACEEE) (Anonim, 2017). Konsumsi listrik per-kapita Indonesia yang saat ini mencapai 850 KWh akan terus meningkat pada masa mendatang, terlebih bila dilihat dari prediksi tingginya pertumbuhan jumlah dan dinamika transportasi. Sementara rendahnya laju penyediaan energi sangat “erat” dengan “keterbatasan” kemampuan pendanaan pemerintah, besarnya subsidi energi untuk BBM dan listrik serta harga pasar yang fluktuatif. Dengan keterbatasan ini, mengakibatkan “sulitnya” membentuk pasar energi yang efisien di dalam negeri, sehingga para produsen energi lebih tertarik untuk mengekspor produk energinya daripada melayani kebutuhan domestik yang tidak kompetitif (Prasetyono, 2017).

Kebutuhan listrik rata-rata meningkat sekitar 6.000 MW/tahun, sedangkan PLN dan IPP hanya mampu memenuhi sekitar 4.200 MW/tahun. Diperkirakan akan ada sekitar 29% kebutuhan tambahan pembangkit sampai dengan tahun 2023 tidak dapat terpenuhi dan dikategorikan skema *unallocated*, yaitu belum ditentukan siapa yang akan membangun dan dari mana sumber pendanaannya. Selain itu, keterlambatan operasional sejumlah pembangkit besar telah menyebabkan kapasitas cadangan operasi (*margin reserve*) menjadi berkurang. Dengan kondisi ini, diperkirakan mulai tahun 2016 akan terjadi kekurangan pasokan tenaga listrik di beberapa daerah karena cadangan operasi semakin menipis, berada di level di bawah 25%. Idealnya cadangan operasi berada di level 25% sampai dengan 30% dari daya mampu netto untuk menjaga reliability sistem tenaga listrik (Widodo, 2017).

Target pemenuhan energi listrik diperkirakan tidak akan terpenuhi dengan hanya mengandalkan minyak, batubara, gas serta pembangkit lain seperti air, panas bumi, angin, matahari, arus laut dan sejenisnya. Beberapa data empiris menyampaikan bahwa “batu bara” dan “gas” kita akan habis pada tahun 2087 dan 2052. Sehingga kebijakan untuk mengandalkan energi fosil akan membahayakan prinsip keberlanjutan (Prasetyono, 2017).

Mengambil data dari berbagai negara bahwa untuk membangkitkan energi listrik sebesar 1000 MWe selama setahun memerlukan bahan bakar sebesar 21 ton uranium, yang setara dengan 970.000 ton gas, 1.310.000 ton bahan bakar minyak dan 2.360.000 ton batu bara. Berdasarkan fakta ini pembangkit listrik berbahan bakar nuklir memenuhi keekonomian dan dapat dipertimbangkan sebagai energi pilihan yang sangat efisien bersih dan memiliki kehandalan tinggi (Prasetyono, 2017).

Pemanfaatan energi nuklir membutuhkan rancangan reaktor berupa Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). PLTN memiliki beberapa jenis reaktor daya, salah satunya LWR (*Light Water Reactor*). LWR memiliki 2 tipe yaitu PWR (*Pressurized Water Reactor*) dan BWR (*Boiling Water Reactor*). Pada penelitian ini penulis mendesain sebuah reaktor nuklir tipe BWR (*Boiling Water Reactor*), dengan daya 500 MWth dapat beroperasi selama 5 tahun tanpa *refueling*. Desain reaktor menggunakan bahan bakar thorium dengan tambahan protactinium-231 sebagai racun bakar (*burnable poison*) dan moderator menggunakan air.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini berupa desain reaktor thermal bertipe *Boiling Water Reactor* (BWR) berbahan bakar thorium oksida (ThO_2) berpendingin air. Kriteria yang harus dimiliki oleh desain ini adalah berukuran kecil beroperasi jangka waktu panjang, *excess reactivity* $\leq 10\%$ dan memiliki distribusi daya merata dengan penambahan *burnable poison*. Strategi penyusunan bahan bakar harus diterapkan untuk memperoleh desain reaktor yang memenuhi kriteria tersebut.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini memiliki tujuan sebagai berikut:

1. Menghitung perhitungan sel bahan bakar.

2. Menghitung faktor multifikasi efektif (*keff*) untuk memantau populasi neutron dalam teras reaktor.
3. Menentukan desain teras reaktor berefisiensi tinggi dalam hal pemakaian bahan bakar.
4. Menghitung parameter survei dari sel bahan bakar berbasis thorium oksida (ThO_2) sebelum ditambahkan racun bakar (*burnable poison*).
5. Menghitung parameter survei dari sel bahan bakar berbasis thorium oksida (ThO_2) dengan penambahan protactinium-231 sebagai racun bakar (*burnable poison*).
6. Membandingkan parameter survei dari sel bahan bakar berbasis thorium oksida (ThO_2) sebelum dan sesudah ditambahkan racun bakar (*burnable poison*).

1.4 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah:

1. Mendesain reaktor berjenis BWR dalam bentuk pemodelan dan simulasi.
2. Untuk mengetahui kondisi jumlah atom dalam satuan waktu pada desain reaktor tipe *Boiling Water Reactor* (BWR) bakar bahan bakar thorium oksida (ThO_2) dengan penambahan protactinium-231 sebagai racun bakar (*burnable poison*) digunakan persamaan difusi multigrup dan *burnup*.
3. Persamaan difusi multigrup, *burnup* dan susunan bahan bakar pada desain reaktor diselesaikan menggunakan *Standard Reactor Analysis Code* (SRAC).

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi yang ingin mengambil tugas akhir tentang desain reaktor dan dapat untuk memperbaiki kekurangan yang ada dalam hasil penelitian ini. Baik untuk desain neutronik dengan umur yang lebih panjang dan dengan tingkat keselamatan yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiwardoyo, 1996. *Prospek PLTN Dalam Penyediaan Energi Nasional*. Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir II, PEBN-Badan Tenaga Nuklir Nasional. Jakarta: 11-17.
- Adiwardoyo, Lasman, A. N., Ruslan, Parmanto, E. M., dan Effendi, E. 2003. *Mengenal Reaktor Nuklir dan Manfaatnya*. Jakarta: Badan Tenaga Nuklir Nasional.
- Aziz, F., Pramudito, S., Hermawan., Rivai, A. K., dan Lasman, A. N., 2002. *Desain Neutronik BWR Modular dengan Siklus Operasi Panjang*. Prosiding Seminar Nasional ke-8 Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional. Jakarta: 79: 88.
- Dewita, E., 2012. *Analisis Potensi Thorium sebagai Bahan Bakar Nuklir Alternatif PLTN*. Jurnal Pengembang Energi Nuklir, 1(14) : 45-56.
- Dewita, E., Rusti, A., dan Tuka, V., 1997. *Studi Pengaruh Perpanjangan Waktu Tinggal Bahan Bakar dalam Teras Reaktor Daya Mini*. Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir III, Badan Tenaga Nuklir Nasional. Jakarta: 355.
- Duderstadt, J. J. dan Hamilton, L. J., 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. New York: John Wiley & Sons.
- ESDM, 2017. Hebat, Indonesia Salah Satu Negara dengan Tingkat Efisiensi Energi Tertinggi, <http://ebtke.esdm.go.id>, diakses pada tanggal 29 Desember 2017.
- ESDM, 2015. Pembangunan Ekonomi Korea Karena PLTN, <http://ebtke.esdm.go.id>, diakses pada tanggal 29 Desember 2017.
- Kretsinger, R.H., Uversky, V.N., dan Permyakov, E.A., 2013. *Encyclopedia of Metalloproteins*. London: Springer Science.
- Masterson, R. E., 2017. *Introduction to Nuclear Reactor Physics*. Florida: CRC Press.
- Okumura K., Kugo, T., Kaneko, K., dan Tsuchihashi, K., 2002. *SRAC version 2002*. Japan Atomic Energy Research Institute (JAERI) Report.
- Parmanto, E. M., dan Irawan, D., 2007. *Mengenal PLTN dan Prospek di Indonesia*. Jakarta: Badan Tenaga Nuklir Nasional.
- Prasetyono, A. P., 2017. Prediksi Pilihan Terakhir Energi, <https://ristekdikti.go.id/>, diakses 29 Desember 2017.

- Riyana, E.S., dan Su'ud Z., 2005. *Preliminary Design Study of Thorium (Th) and Protactinium (^{231}Pa) Based Fuel for Tight Lattice Long Life BWR*. Indonesian Journal of Physics 4(16): 111.
- Ro'uf, A. dan Su'ud, Z., 2016. *Analysis of Burnable Poison Effect on Combined (Th-U)O₂ Fuel Cycle Performance in 800 MWt Long-Life PWR*. Indian Journal of Science and Technology 9(28): 3, 6.
- Simanjuntak, S.A., 2017. *Perhitungan Pembakaran Lengkap (Burn-Up) Reaktor Air Superkritis Bahan Bakar Thorium Model Perangkat (Assembly) Heksagonal Menggunakan Srac*. Skripsi. Universitas Lampung.
- Sofaa, I.R., 2016. *Desain Reaktor Air Superkritis (Supercritical Water Reactor) Model Teras Silinder (r,z) menggunakan Bahan Bakar Uranium–Thorium*. Skripsi. Lampung: Universitas Lampung.
- Stacey, W. M., 2001. *Nuclear Reactor Physics*, USA: John Wiley & Sons.
- Subkhi, M. N., 2016. *Desain Konsep dan Analisis Reaktor Air Bertekanan (PWR) Berdaya Kecil Berumur Panjang Berbahan Bakar Thorium*. Disertasi. Bandung: Institut Teknologi Bandung.
- Trianti, N., Su'ud, Z., dan Riyana, E.S., 2011. *Design Study of Thorium Cycle Based Long Life Modular Boiling Water Reactors*. Indonesian Journal of Physics 4(22): 133.
- Vattenfall, 2013. Nuclear power – how it works, <https://corporate.vattenfall.com>, diakses pada tanggal 4 Maret 2018.
- Widodo, S., 2017. *Energi Alternatif Menuju Ketahanan Energi Nasional*. Seminar Nasional Inovasi Teknologi Terapan Poltekba 2107, Badan Tenaga Nuklir Nasional Yogyakarta: 44.
- Wilson, J. N., Bidaud, A., Callan, N., Chambon, R., David, A., Guillemin, P., Ivanov, E., Nuttin, A., Meplan, O. 2009. *Economy of Uranium Resources In A Three-component Reactor Fleet with Mixed Thorium/Uranium Fuel Cycles*. Journal of Annals of Nuclear Energy. Page 404 – 408.
- Zweifel, P. F. 1973. *Reactor Physics*. USA: McGraw-Hill.