

**DESAIN NEUTRONIK REAKTOR CEPAT
TIPE GFR (*GAS-COOLED FAST REACTOR*) DENGAN
MENGUNAKAN *MODIFIED* CANDLE BERBASIS BAHAN
BAKAR URANIUM METAL (U-10%wtZr)**

SKRIPSI

**Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains Bidang Studi Fisika**



Oleh:

HARTIWI

08021181419001

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

LEMBAR PENGESAHAN

DESAIN NEUTRONIK REAKTOR CEPAT
TIPE GFR (*GAS-COOLED FAST REACTOR*) DENGAN
MENGUNAKAN *MODIFIED CANDLE* BERBASIS BAHAN
BAKAR URANIUM METAL (U-10%wtZr)

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains Bidang Studi Fisika

Oleh:

HARTIWI

08021181419001

Inderalaya, Juni 2018

Pembimbing II



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

NIP: 197211252000122001

Pembimbing I



Dr. Fiber Monado, S.Si, M.Si.

NIP: 197002231995121002

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika



Dr. Frinsyah Virgo, M.T.

NIP: 197009101994121001

KATA PERSEMBAHAN

“Maka sesungguhnya bersama kesulitan ada kemudahan. Maka apabila engkau telah selesai (dari sesuatu urusan), tetaplah bekerja keras
(untuk urusan yang lain). Dan hanya kepada tuhanmulah engkau berharap”.(QS>Al-Insyirah: 6-8)

“saat kenyataan tak sesuai harapan maka saat itu juga usaha dan do'a harus lebih ditingkatkan”.(Hartiwi)

Tanpa berpaling dari Mu,

Ku persembahkan skripsi ini untuk mereka yang aku sayangi:

- Mamak (Disnila) dan Bapak (Kopran, Darlan)
- Kedua Adikku (Aniati dan Juliati)
- Dosen Pembimbing (Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si., dan Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si.,)
- Sahabatku (Purwati Ningsih, Eva Nuryana dan Desi Rahmita Rambe)
- Berandal 2014
- Almamaterku (Fisika FMIPA Universitas Sriwijaya)

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat serta karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang berjudul “**Desain Neutronik Reaktor Cepat Tipe GFR (*Gas-cooled Fast Reactor*) dengan menggunakan *Modified* CANDLE Berbasis Bahan Bakar Uranium Metal (U-10%wtZr)**”. Penulisan skripsi ini dibuat untuk melengkapi salah satu persyaratan kurikulum di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih banyak terdapat kekurangan, karena keterbatasan kemampuan dan pengetahuan yang penulis miliki. skripsi ini tidaklah mungkin dapat diselesaikan tanpa adanya bantuan dan bimbingan yang telah diberikan oleh berbagai pihak. Untuk itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua Bapak dan Ibu serta kedua adik penulis yang selalu memberikan doa dan dukungan sepenuhnya.
2. Bapak Dr. Frinsyah Virgo, M.T selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
3. Bapak Drs. Pradanto, DEA. selaku dosen pembimbing akademik.
4. Bapak Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing I dan Ibu Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si., selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan waktu, bimbingan, dan kesabaran dalam membantu penulis menyelesaikan skripsi ini.
5. Bapak Khairul Saleh, S.Si., M.Si., Ibu Dr. Erry Koriyanti, M.T., dan Dra. Jorena, M.Si., selaku Dosen Penguji yang telah memberikan kritik dan saran.
6. Bapak dan ibu dosen serta staff administrasi jurusan fisika FMIPA Universitas Sriwijaya.
7. Sahabat perjuangan KBI ELINKOMNUK, Purwati, Fatiyah, Anisa, Tasya, Elza, Luut, Fitri, Abdu, Novaldan, Iwan, Bambang dan Ncep. Terima kasih atas do'a dan dukungannya.
8. Kepada semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan tugas akhir dan penyusunan skripsi yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Akhir kata penulis berharap semoga skripsi yang disusun ini dapat bermanfaat sekaligus menambah ilmu pengetahuan bagi penulis maupun pembaca, Amin.

Inderalaya, Juni 2018

Penulis

Hartiwi

**DESAIN NEUTRONIK REAKTOR CEPAT
TIPE GFR (*GAS-COOLED FAST REACTOR*) DENGAN
MENGUNAKAN *MODIFIED CANDLE* BERBASIS BAHAN
BAKAR URANIUM METAL (U-10%wtZr)**

**Oleh :
Hartiwi
08021181419001**

ABSTRAK

Penelitian ini membahas mengenai hasil perhitungan neutronik pada desain reaktor nuklir PLTN tipe GFR daya termal 500 MWt berbasis bahan bakar uranium metal (U-10%wtZr), pendingin karbon dioksida (CO₂) dan *cladding* berupa *stainless Steel* 316. Menggunakan Strategi *burnup modified CANDLE* saat proses pembakaran berlangsung menghasilkan desain yang ekonomis dalam hal penggunaan bahan bakar. Perhitungan persamaan *burnup* sel bahan bakar dan persamaan difusi multigrup dalam teras reaktor selama 100 tahun dilakukan dengan menggunakan modul PIJ dan CITATION pada SRAC yang menghasilkan beberapa parameter *survey* yaitu *level burnup*, faktor multiplikasi tak hingga (k_{inf}), *conversion ratio*, densitas atom, distribusi daya dan faktor multiplikasi efektif (k_{eff}). Hasil perhitungan pada SRAC dilakukan dengan mengoptimasi ukuran teras reaktor dan didapatkan ukuran teras aktif yang optimal yaitu tinggi teras aktif 180 cm dan jejari teras aktif 100 cm dengan fraksi volume 65% *fuel*, 10% *cladding*, 25% *coolant* dan diameter pin *pitch* 1,4 cm. Hal ini dilihat dari nilai faktor multiplikasi efektif sebesar 1,036189 yang berarti reaktor dapat terus beroperasi selama 1 siklus pengisian sel bahan bakar (per 10 tahun).

Kata Kunci : GFR, Uranium Metal, CO₂, *Modified CANDLE*, SRAC, k_{eff} .

**NEUTRONIK DESIGNS OF FAST REACTOR TYPE GFR
(GAS-COOLED FAST REACTOR) USING MODIFIED CANDLE
BASED IN URANIUM METAL FUEL (U-10%WTZR)**

By :

Hartiwi

08021181419001

ABSTRACT

This study discusses the results of neutronic calculation at the design nuclear reactor type of GFR 500 MWt thermal power plant based on metallic uranium fuel (U-10%wtZr), carbon dioxide (CO₂) coolant and cladding material is Stainless Steel 316. Using modified CANDLE burnup strategy during the burning process results in an economical design in terms of fuel use. The calculation of fuel cell burnup equation and multigrup diffusion equation in reactor core for 100 years is done by using PIJ and CITATION module on SRAC which yield some survey parameters as burnup level, infinity multiplication factor (k_{inf}), conversion ratio, atomic density, power distribution and effective multiplication factor (k_{eff}). The result of calculation at SRAC was done by optimizing the reactor core size and the optimal active core size was active height of 180cm and 200 cm active core jejari with volume fraction of 65% fuel, 10% cladding, 25% coolant and picth pin diameter 1.4 cm. This is seen from the effective multiplication factor value of 1.036189 which means the reactor can continue to operate for one cycle of fuel cell refueling 10 years.

Keywords : GFR, Metallic Uranium, CO₂, Modified CANDLE, SRAC, k_{eff} .

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	
LEMBAR PENGESAHAN	
KATA PENGANTAR	i
ABSTRAK	iii
ABSTRACT	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR TABEL	viii
DAFTAR ISTILAH	ix
BAB I : PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II : TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)	4
2.2 Reaktor Nuklir	5
2.2.1 Bahan Bakar (<i>Fuel</i>)	6
2.2.2 Moderator dan Pendingin (<i>Coolant</i>)	7
2.2.3 Batang Kendali	7
2.2.4 Perisai Pengukung	8
2.2.5 <i>Cladding</i>	8
2.3 Reaksi Fisi Nuklir	8
2.4 Jenis-Jenis Reaktor	9
2.5 <i>Gas-cooled Fast Reactor</i> (GFR)	10
2.6 Analisa Neutronik	12
2.6.1 Penampang Lintang Reaksi Nuklir	13
2.6.2 Persamaan Difusi Satu Grup	14
2.6.3 Persamaan Difusi Multigrup	15
2.6.4 Persamaan <i>Burnup</i>	16

2.6.5 Faktor Multiplikasi (k)	18
2.6.6 <i>Conversion Ratio</i> (CR)	19
2.7 <i>System Reactor Atomic Code</i> (SRAC)	20
BAB III : METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	21
3.2 Alat dan Bahan	21
3.3 Metode Penelitian	21
3.4 Langkah Kerja	21
3.5 Parameter dan Spesifikasi Desain Reaktor	22
3.6 Geometri Sel Bahan Bakar	23
3.7 Geometri Teras Reaktor	24
3.8 Strategi <i>Burnup</i>	24
3.9 <i>Survey</i> Parameter	25
BAB IV : HASIL DAN PEMBAHASAN	
4.1 Analisa Neutronik	26
4.2 Hasil Perhitungan Sel Bahan Bakar	26
4.2.1 Level Burnup	29
4.2.2 Faktor Multiplikasi Tak Hingga (k_{inf})	30
4.2.3 <i>Conversion Ratio</i>	30
4.2.4 Densitas Atom U^{238} , U^{235} , Pu^{239} dan Pu^{240}	31
4.2.5 Faktor Multiplikasi Efektif (k_{eff})	33
4.2.6 Distribusi Daya	34
BAB V : PENUTUP	
5.1 Kesimpulan	36
5.2 Saran	36
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Perbedaan prinsip kerja PLTU dan PLTN	5
Gambar 2.2 Disintegrasi berurutan U^{235} dan U^{238}	6
Gambar 2.3 Proses reaksi fisi berantai	9
Gambar 2.4 Diagram skematik GFR	11
Gambar 2.5 Skema komponen reaktor	12
Gambar 2.6 Prinsip kesetimbangan nuklida A	16
Gambar 2.7 Skema <i>modified CANDLE burnup</i>	18
Gambar 2.8 Faktor multiplikasi neutron	19
Gambar 3.1. Langkah perhitungan neutronik sel bahan bakar dan teras reaktor menggunakan program SRAC	22
Gambar 3.2. Geometri sel bahan bakar	23
Gambar 3.3. Geometri dan ukuran teras reaktor	24
Gambar 3.4. Skema <i>modified CANDLE burnup</i>	25
Gambar 4.1 Susunan bahan bakar di dalam 1/2 teras reaktor	27
Gambar 4.2 Nilai k_{eff} dengan variasi tinggi teras aktif dan jejari 100 cm	27
Gambar 4.3 Nilai k_{eff} dengan variasi jejari teras aktif dan tinggi 180 cm	28
Gambar 4.4 Perubahan <i>level burnup</i> selama 100 tahun	29
Gambar 4.5 Nilai faktor multiplikasi tak hingga selama 100 tahun	30
Gambar 4.6 Nilai <i>conversion ratio</i> selama 100 tahun	31
Gambar 4.7 Perubahan densitas U^{235} dan atom U^{238} selama <i>burnup</i>	32
Gambar 4.8 Perubahan densitas atom Pu^{239} dan Pu^{240} selama <i>burnup</i>	32
Gambar 4.9 Nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff})	33
Gambar 4.10 Distribusi daya arah radial	34

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Parameter dan spesifikasi desain <i>Gas-cooled Fast Reactor</i> (GFR)	23
--	----

DAFTAR ISTILAH

<i>Burnup</i>	: banyaknya energi yang dihasilkan persatuan berat bahan bakar dalam reaktor.
<i>Cladding</i>	: berupa kelongsong yang berfungsi sebagai pelindung bahan bakar dan pemisah bahan bakar dengan pendingin.
<i>Conversion ratio</i>	: perbandingan antara jumlah atom fisil bahan bakar yang produksi dengan jumlah atom fisil bahan bakar yang dikonsumsi dalam reaktor.
Densitas Atom	: populasi atom dalam setiap satuan volume.
<i>Excess reactivity</i>	: kelebihan reaktivitas.
Fisi	: reaksi pembelahan antara partikel neutron dengan inti atom yang disertai dengan pelepasan neutron dan energi.
Fusi	: reaksi penggabungan antara dua inti atom yang ringan menjadi inti atom yang lebih berat disertai dengan pelepasan energi.
Material Fertile	: suatu unsur/atom yang tidak dapat langsung membelah setelah menangkap neutron tetapi akan membentuk bahan fisil.
Material Fisil	: suatu unsur/atom yang langsung dapat membelah apabila menangkap neutron.
k_{eff}	: konstanta yang digunakan untuk memantau populasi neutron dalam teras reaktor dengan memperhitungkan faktor kebocoran ke luar teras reaktor.
k_{inf}	: konstanta untuk mengetahui tingkat populasi neutron di dalam satu sel bahan bakar tanpa adanya faktor kebocoran ke luar teras reaktor.
<i>Level burnup</i>	: total energi yang dihasilkan dalam satu hari per ton bahan bakar.
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	: <i>microscopic cross-section</i> .

Σ : *macroscopic cross-section.*
 λ : konstanta peluruhan.
 ϕ : fluks neutron.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mayoritas kebutuhan energi dunia disuplai dari energi fosil, khususnya pada negara-negara berkembang seperti di negara Indonesia. Pembangkit listrik dengan bahan bakar fosil seperti batubara, minyak bumi dan gas mempunyai potensi menimbulkan dampak negatif bagi lingkungan berupa CO₂ (karbon dioksida), SO₂ (sulfur dioksida) dan NO₂ (nitrogen oksida) yang nantinya dapat menimbulkan hujan asam dan pemanasan global (www.batan.go.id). Selain itu, ketersediaan bahan bakar fosil di Indonesia semakin lama akan semakin menipis sehingga tidak memungkinkan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik dalam jangka panjang.

Menurut Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) kondisi kelistrikan nasional tahun 2014 memiliki total kapasitas pembangkit listrik yang terpasang di Indonesia sebesar 53,733 MWt dimana konsumsi energi listrik mencapai 199 TWh dan produksi tenaga listrik sebesar 228 TWh, sedangkan kondisi kelistrikan awal maret 2015 Indonesia memiliki sistem sebanyak 24 sistem diantaranya 5 normal, 14 siaga dan 5 defisit (pemadaman sebagian). Dalam mengatasi masalah kebutuhan energi dan pencemaran lingkungan Indonesia akibat penggunaan bahan bakar fosil dimasa datang diperlukan penggunaan sumber energi alternatif.

Sumber energi alternatif yang dimaksud adalah pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) berupa reaktor nuklir. Salah satu reaktor nuklir Generasi IV yaitu reaktor cepat tipe *Gas-cooled Fast Reactor* (GFR) yang sedang dalam tahap pengembangan dan baru akan dikomersialkan setelah tahun 2030. Fitur GFR berupa pendingin helium spektrum cepat dan perputaran bahan bakar tertutup. Temperatur *outlet* yang tinggi dari pendingin helium memungkinkan untuk menghasilkan listrik dan hidrogen dengan efisiensi tinggi (Ariani dkk, 2013). Penelitian mengenai reaktor GFR telah sering dilakukan seperti penelitian mengenai studi awal desain konseptual reaktor cepat tipe GFR dengan uranium metal (U-10%wtZr) sebagai *input* bahan bakar, penelitian ini membahas hasil perhitungan neutronik dengan strategi *burnup Modified CANDLE* yang memiliki daya termal 500 MWt berpendingin helium (Monita dkk, 2015). Menerapkan strategi *burnup Modified CANDLE* pada reaktor tipe GFR memungkinkan harga listrik menjadi sangat murah sekaligus memiliki tingkat keselamatan yang sangat tinggi, lepasnya

ketergantungan dari teknologi pengayaan uranium serta pemrosesan ulang bahan bakar nuklir dan reaktor ini juga mampu membakar limbah nuklir untuk menambah pasokan energinya (Ariani, 2015). Penelitian ini dilakukan pada reaktor cepat dengan memanfaatkan karbon dioksida (CO₂) sebagai pendingin dan menerapkan strategi *burnup Modified CANDLE* menggunakan uranium metal (U-10%wtZr) sebagai *input* bahan bakar.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini berupa desain neutronik GFR dengan menerapkan strategi *burnup Modified CANDLE* berpendingin karbon dioksida dan memiliki daya termal 500 MWt. Kesesuaian antara ukuran geometri teras dengan konfigurasi bahan bakar uranium alam diperlukan agar parameter yang dihasilkan memenuhi desain terkait faktor kekritisan reaktor dan keamanan.

1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan menghasilkan desain yang memiliki efisiensi tinggi baik dalam penggunaan bahan bakar maupun faktor keselamatan dengan melakukan beberapa perhitungan diantaranya:

1. Melakukan perhitungan sel bahan bakar yang menghasilkan parameter *survey* berupa *level burnup*, faktor multiplikasi tak hingga (k_{inf}) dan *conversion ratio*.
2. Melakukan perhitungan teras reaktor yang menghasilkan parameter *survey* berupa faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) dan *excess reactivity* selama 10 tahun.
3. Menentukan distribusi daya dalam teras reaktor.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Melakukan perhitungan parameter neutronik berdasarkan perilaku neutron pada teras reaktor tipe GFR dengan menggunakan persamaan *burnup* dan difusi multigrup.
2. Penelitian desain neutronik reaktor cepat tipe GFR ini dilakukan dengan menggunakan bahan bakar berupa uranium metal (U-10%wtZr) dan karbon dioksida sebagai pendingin (*coolant*).

1.5 Manfaat Penelitian

Dengan tercapainya tujuan pada penelitian ini, manfaat yang dapat diberikan adalah menghasilkan desain reaktor tipe GFR dengan daya termal 500 MWt berpendingin CO₂ berbasis uranium alam yang memiliki efisiensi tinggi, baik dalam hal penggunaan bahan bakar maupun faktor keselamatan.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiwardojo, Lasman, A. N., Ruslan, Parmanto, E. M. dan Effendi, E, 2010. *Mengenal Reaktor Nuklir dan Manfaatnya*. Jakarta: Badan Tenaga Nuklir Nasional Pusat Diseminasi Iptek Nuklir.
- Anggoro, Y. D., Nurlaila, D. D. dan Yuliyanto, A. T., 2013. *Kajian Perkembangan PLTN Generasi IV*. Jurnal Pengembangan Energi Nuklir 2(15): 72-73.
- Ariani, M., Su'ud, Z. dan Monado, F., 2013. *Desain reaktor cepat berpendingin gas 600 MWth dengan Uranium Alam sebagai Input Siklus Bahan Bakar*. Jurnal Ilmu Dasar 1(14): 12.
- Ariani, M., Supardi, Monado, F. dan Su'ud, Z., 2015. *Potensi Thorium sebagai Bahan Bakar pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas untuk PLTN*. Prosiding Semirata Bidang MIPA BKS-PTN Barat. Hal: 40.
- Duderstadt, J. J. dan Hamilton, L. J., 1976. *Nuclear Reactor Analysis*. New York: John Wiley & Sons.
- Irka, F. H. dan Su'ud, Z., 2015. *Analisis Burnup pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan Bahan Bakar Uranium Alam*. Jurnal Ilmu Fisika (JIF) 2(7): 79.
- Kadir, A., 1982. *Energi: Sumber Daya, Inovasi, Tenaga Listrik dan Potensi Ekonomi*. Jakarta: Universitas Indonesia.
- KESDM (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral). 2008. *Ahli Nuklir Indonesia Berpengalaman 30 Tahun Lebih Operasika Reaktor Nuklir*. Diakses pada 21 September 2017, dari: <http://www.esdm.go.id>.
- Moehtadi, F., Sanyoto, A. dan Setiawati, A., 2007. *Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Manfaat dan Potensi Bahayanya*. Jakarta: Kementerian Negara Riset dan Teknologi.
- Monado, F., Su'ud, Z., Waris, A., Basar, K., Ariani, M. dan Sekimoto, H., 2013. *Application of Modified CANDLE Burnup to Very Small Long Life Gas-cooled Fast Reactor*. Advanced Materials research (772): 506.
- Monita, N., Ariani, M. dan Monado, F., 2015. *Studi Awal Konseptual Reaktor Cepat Tipe GFR dengan Uranium Metal sebagai Input Bahan Bakar*. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir (1): 275

- Murray, R. L. dan Holbert, K. E., 2015. *Nuclear Energy an Introduction to the Concept, Systems, and Application of Nuclear Processes Seventh Edition*. USA: Elseveir Inc.
- Okawa, T., Nakayama, S. dan Sekimoto, H., 2012. *Design Study on Power Flattening to Sodium Cooled Large-Scale CANDLE Burning Core with Using Thorium Fuel*. *Energy Conversion and Management* (53): 182-184.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., Tsuchihashi, K., 2002. *The Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. Japan: JAEA.
- Peryoga, Y., Parmanto, E. M. dan Pranoto, A., 2007. *Mengenal Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir*. Jakarta: Kementerian Riset dan Teknologi.
- Riska, Fitriyani, D. dan Irka F. H., 2016. *Analisis Neutronik pada Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) dengan Variasi Bahan Pendingin (He, CO₂, N₂)*. *Jurnal Fisika Unand* 1(5): 29.
- Samiaji, T., 2011. *Gas CO₂ di Wilayah Indonesia*. *Berita Dirgantara* 2(12): 68-69.
- Susana, T., 1988. *Karbon Dioksida*. *Oseana* 1(13): 1,3.
- Su'ud, Z. dan Sekimoto, H., 2013. *The Prospect of Gas Cooled Fast Reactors for Long Life Reactors with Natural Uranium as Fuel Cycle Input*. *Jurnal Annals of Nuclear Energy* (54): 58-64.
- Waltar, A. E. dan Reynolds, A. B., 1981. *Fast Breeder Reactors*. New York: Pergamon Press.
- Zuhair, 2012. *Studi Model Teras Reaktor Generasi IV dengan Spektrum Neutron Cepat dalam Perhitungan Multiplikasi Neutron*. *Simetri jurnal ilmu fisika indonesia* 2(1): 52.
- <http://www.batan.go.id>, diakses pada 09 Februari 2018.