

**ANALISIS JUMLAH PRODUK *MOLYBDENUM-99* ( $^{99}\text{Mo}$ )  
SEBAGAI FUNGSI WAKTU *BURN-UP* PADA NILAI  
KRITIKALITAS OPTIMUM PADA *AQUEOUS*  
*HOMOGENEOUS REACTOR* (AHR)**



Disusun oleh:  
**KHODIJAH AMINI**  
M0211043

**SKRIPSI**

**Diajukan untuk memenuhi sebagian  
persyaratan mendapatkan gelar Sarjana Sains**

**JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS SEBELAS MARET  
SURAKARTA  
Juni, 2015**

*commit to user*

**HALAMAN PENGESAHAN**

Skripsi dengan judul : Analisis Jumlah Produk *Molybdenum-99* ( $^{99}\text{Mo}$ ) sebagai Fungsi Waktu *Burn-Up* pada Nilai Kritikalitas Optimum pada *Aqueous Homogeneous Reactor* (AHR)

Yang ditulis oleh :  
Nama : Khodijah Amini  
NIM : M0211043

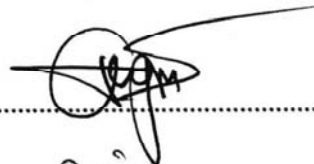
Telah diuji dan dinyatakan lulus oleh dewan penguji pada :  
Hari : Senin  
Tanggal : 15 Juni 2015

Anggota Tim Penguji :

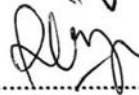
1. Dr. Eng. Kusumandari, S.Si., M.Si.  
NIP. 19810518 200501 2 002



2. Drs. Suharyana, M.Sc.  
NIP. 19611217 198903 1 003



3. Dra. Riyatun, M.Si.  
NIP. 19680226 199402 2 001



4. Dr. Azizul Khakim, S.T., M.Eng.  
NIP. 19711224 199912 1 001



Disahkan pada tanggal 28 Juli 2015 .  
oleh

Kepala Program Studi Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Sebelas Maret Surakarta



**Dr. Fahru Nurosyid, S.Si., M.Si.**  
NIP. 19721013 200003 1 002

## PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi intelektual Skripsi saya yang berjudul “ANALISIS JUMLAH PRODUK *MOLYBDENUM-99* ( $^{99}\text{Mo}$ ) SEBAGAI FUNGSI WAKTU *BURN-UP* PADA NILAI KRITIKALITAS OPTIMUM PADA *AQUEOUS HOMOGENEOUS REACTOR* (AHR)” adalah hasil kerja saya dan sepengetahuan saya hingga saat ini. Skripsi tidak berisi materi yang telah dipublikasikan atau ditulis oleh orang lain atau materi yang telah diajukan untuk mendapat gelar kesarjanaan di Universitas Sebelas Maret atau di Perguruan Tinggi lainnya kecuali telah dituliskan di daftar pustaka Skripsi ini dan segala bentuk bantuan dari semua pihak telah ditulis di bagian ucapan terimakasih. Isi Skripsi ini boleh dirujuk atau difotocopy secara bebas tanpa harus memberitahu penulis.

Surakarta, 31 Mei 2015

KHODIJAH AMINI

**MOTTO**

....يَرْفَعُ اللَّهُ الَّذِينَ ءَامَنُوا مِنكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ.... ﴿١١﴾

“...Allah akan meninggikan orang-orang yang beriman di antaramu dan orang-orang yang diberi ilmu pengetahuan beberapa derajat...”

(Q.S. Al Mujaadalah : 11)

فَإِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا ﴿٥﴾ إِنَّ مَعَ الْعُسْرِ يُسْرًا ﴿٦﴾

“Karena Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.  
Sesungguhnya sesudah kesulitan itu ada kemudahan.”

(Q.S. Al Insyirah : 5-6)

## PERSEMBAHAN

Alhamdulillah, atas Rahmat dan Barokah **ALLAH SWT**, proses skripsi ini berjalan lancar.

Selesainya skripsi ini saya persembahkan pada :

Ibuk, Dek Hanif, dan Dek Nuaim

Rekan-rekan Grup Riset Nuklir dan Radiasi UNS

Teman-teman FISIKA 2011

Rekan-rekan seperjuangan di SMA MTA Surakarta

Adek-adekku di Asrama Putri SMA MTA Surakarta

Semuanya yang tertarik dengan Fisika Nuklir

**Analisis Jumlah Produk *Molybdenum-99* ( $^{99}\text{Mo}$ ) sebagai Fungsi Waktu *Burn-up* pada Nilai Kritikalitas Optimum pada *Aqueous Homogeneous Reactor* (AHR)**

KHODIJAH AMINI

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam  
Universitas Sebelas Maret

**ABSTRAK**

Analisis jumlah produksi  $^{99}\text{Mo}$  dilakukan dengan simulasi neutronik menggunakan *software* MCNPX, dimana  $^{99}\text{Mo}$  dihasilkan dari fisi  $^{235}\text{U}$  dalam AHR. Model geometri AHR berupa silinder berdiameter 122 cm, tinggi 155 cm. Terdiri dari reflektor *beryllium* setebal 30 cm, tangki *stainless steel* setebal 3 cm, dan bahan bakar. Larutan  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$  berkonsentrasi 250 gU/l digunakan sebagai bahan bakar, dengan variasi pengayaan  $^{235}\text{U}$  dari 15% hingga 25%. Kritikalitas AHR ditinjau dari nilai  $k_{\text{eff}}$ , dimana diperoleh hubungan bahwa naiknya pengayaan menghasilkan naiknya  $k_{\text{eff}}$ . Pada  $k_{\text{eff}}$  optimum (16%) dilakukan perhitungan *burn-up* selama 15 hari dan dikaji produksi  $^{99}\text{Mo}$  meliputi aktivitas dan massa. Laju produksi netto terdiri dari laju produksi hasil fisi dikurangi laju peluruhan, menghasilkan persamaan eksponensial  $y=1,2993 \times 10^{20}(1-e^{-0,2523t})$  sebagai fungsi waktu dalam satuan hari. Dari *burn-up* 15 hari diperoleh bahwa laju produksi netto masih terus naik mendekati laju konstan. Hasil  $^{99}\text{Mo}$  akan diekstrak pada hari ke-11 dengan aktivitas 2118 6-day Ci dan massa 0,02 gram.

Kata kunci : AHR, MCNPX, Radiofarmaka,  $^{99}\text{Mo}$

## **Analysis of Molybdenum-99 ( $^{99}\text{Mo}$ ) Product as a Function of Burn-up Time on Optimum Criticality on Aqueous Homogeneous Reactor (AHR)**

KHODIJAH AMINI

Physics Department, Faculty of Mathematics and Natural Sciences  
Sebelas Maret University

### **ABSTRACT**

Analysis of the amount of  $^{99}\text{Mo}$  production has been done by neutronic simulation using MCNPX software, which  $^{99}\text{Mo}$  is produced from fission  $^{235}\text{U}$  on AHR. The AHR geometry is of a cylinder with a diameter of 122 cm, height of 155 cm, 30 cm thick beryllium reflector, 3 cm thick stainless steel tank, and fuel. The  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$  solutions with concentration of 250 gU/l is used as a fuel, with the enrichment variation of  $^{235}\text{U}$  from 15% to 25%. AHR criticality expressed by  $k_{eff}$  value that directly proportional with the enrichment value. At optimum  $k_{eff}$  (16%) used to burn-up calculation for 15 days, and result  $^{99}\text{Mo}$  production is activities and mass. Nett production rate is composed of fission product rate that reduce by decay rate, and the result in an exponential equation  $y=1,2993 \times 10^{20} (1 - e^{-0,2523t})$  as a function of time in days. On 15 days burn-up showed that the nett production rate still increases close to a constant rate.  $^{99}\text{Mo}$  results will be extracted on 11<sup>th</sup> day with activity 2118 6-day Ci and 0.02 gram mass.

Keywords : AHR, MCNPX, Radiopharmaceutical,  $^{99}\text{Mo}$



## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, ALLAH SWT telah memberikan amat banyak Rahmat dan BarokahNya, sehingga penulis dapat menyelesaikan proses skripsi ini dengan lancar dan dimudahkan.

Skripsi yang penulis susun sebagai bagian dari syarat memperoleh gelar Sarjana Sains ini berjudul “Analisis Jumlah Produk *Molybdenum-99* ( $^{99}\text{Mo}$ ) sebagai Fungsi Waktu *Burn-Up* pada Nilai Kritikalitas Optimum pada *Aqueous Homogeneous Reactor* (AHR)”. terselesaikannya skripsi ini adalah kebahagiaan tersendiri bagi penulis setelah melalui berbagai perjuangan dalam seluruh prosesnya. Dengan semua suka dukanya, akhirnya skripsi ini dapat terselesaikan.

Oleh karenanya, penulis ingin menyampaikan rasa terimakasih kepada :

1. Dra. Riyatun, M.Si. dan Drs. Suharyana, M.Sc. selaku pembimbing penelitian dari UNS yang telah mendampingi selama proses penelitian, selalu sabar membimbing, mengoreksi, dan mengarahkan dari awal proses hingga skripsi ini selesai.
2. Dr. Azizul Khakim, S.T., M.Eng. dan Arif Isnaeni, S.T., M.T. selaku pembimbing dari BAPETEN yang telah membantu banyak referensi, meluangkan waktu untuk diskusi, membimbing, dan mengarahkan selama proses penelitian hingga skripsi ini selesai.
3. Teman-teman seperjuangan, Susanti, Octaviana Erawati Fadli, dan Poundra Setiawan, yang selalu bersedia bertukar ilmu.
4. Keluarga besar Fisika 2011
5. Semua pihak yang telah banyak membantu kelancaran skripsi ini.

Semoga ALLAH SWT memberikan balasan yang lebih baik atas bantuannya selama ini. Penulis menyadari masih banyak kekurangan dari isi maupun penyajian materi. Oleh karena itu penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang membangun guna perbaikan dimasa selanjutnya.

Semoga laporan skripsi ini dapat memberikan manfaat khususnya bagi penulis dan umumnya bagi pembaca.

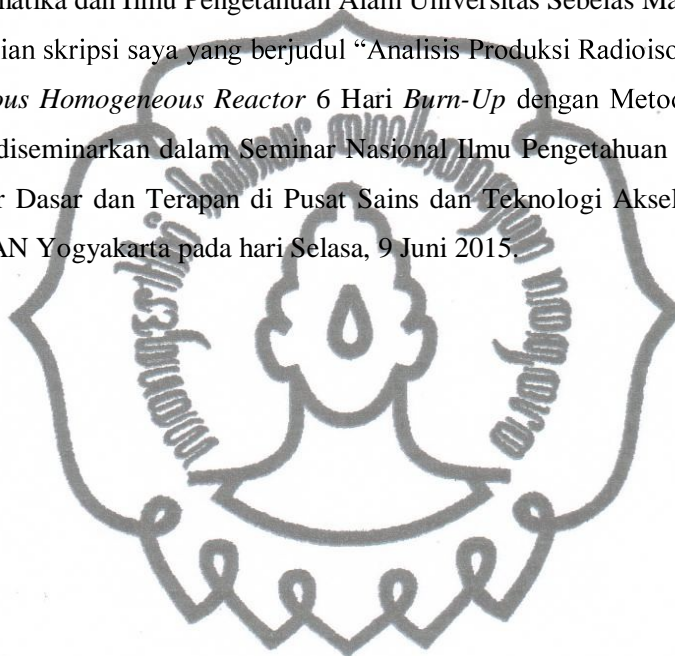
Surakarta, 31 Mei 2015

KHODIJAH AMINI



## HALAMAN PUBLIKASI

1. Sebagian skripsi saya yang berjudul “Analisis Jumlah Produk *Molybdenum-99* ( $^{99}\text{Mo}$ ) sebagai Fungsi Waktu *Burn-Up* pada Nilai Kritikalitas Optimum pada *Aqueous Homogeneous Reactor* (AHR)” dipublikasikan di Repository Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sebelas Maret.
2. Sebagian skripsi saya yang berjudul “Analisis Produksi Radioisotop  $^{99}\text{Mo}$  pada *Aqueous Homogeneous Reactor* 6 Hari *Burn-Up* dengan Metode Komputasi” telah diseminarkan dalam Seminar Nasional Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir Dasar dan Terapan di Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA) BATAN Yogyakarta pada hari Selasa, 9 Juni 2015.



## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	i
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	ii
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	iii
<b>HALAMAN MOTTO</b> .....	iv
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	v
<b>HALAMAN ABSTRAK</b> .....	vi
<b>HALAMAN ABSTRACT</b> .....	vii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	viii
<b>HALAMAN PUBLIKASI</b> .....	ix
<b>DAFTAR ISI</b> .....	x
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xiii
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	xiv
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	xv
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Perumusan Masalah .....	4
1.3. Batasan Masalah .....	5
1.4. Tujuan Penelitian .....	6
1.5. Manfaat Penelitian .....	6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	7
2.1. Interaksi Neutron dengan Materi .....	7
2.1.1. Hamburan Neutron .....	7
2.1.2. Serapan Neutron .....	7
2.2. Tampang Lintang .....	8
2.3. Reaksi Fisi Nuklir .....	9
2.4. Reaktor Nuklir .....	11
2.5. <i>Aqueous Homogeneous Reactor (AHR)</i> .....	11
2.5.1. Bahan Bakar .....	12
2.5.2. Batang Kendali .....	14
2.5.3. Reflektor .....	14
2.5.4. Sistem Pendingin .....	15
2.5.5. Sistem Perisai Berlapis .....	15
2.5.6. Sistem Manajemen Gas .....	16
2.6. Parameter AHR .....	16
2.6.1. Pengayaan <sup>235</sup> U .....	16
2.6.2. Kritikalitas .....	16
2.6.3. Reaktivitas .....	18
2.6.4. Margin Shutdown .....	19
2.7. <sup>99</sup> Mo sebagai Produk Fisi AHR .....	19
2.8. Laju Produksi dan Peluruhan Radioaktif .....	20

2.9. Menghitung Densitas Atom.....	23
2.10. <i>Monte Carlo N Particle version X</i> (MCNPX) .....	24
2.10.1. Input MCNPX .....	24
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	27
3.1. Tempat dan Waktu Penelitian.....	27
3.2. Alat dan Bahan.....	27
3.3. Langkah Penelitian.....	27
3.3.1. Tahap Persiapan.....	27
3.3.2. Pembuatan Geometri dan Pendefinisian Material Penyusun AHR.....	28
3.3.3. Validasi Input AHR.....	29
3.3.4. <i>Parametric Study</i> Jumlah Neutron yang Disimulasikan .....	29
3.3.5. Perhitungan Nilai $k_{eff}$ dengan Variasi Pengayaan $^{235}\text{U}$ .....	30
3.3.6. Perhitungan <i>Burn-Up</i> AHR dengan Variasi <i>Time Step</i> .....	30
3.3.7. Analisis Hasil Produksi $^{99}\text{Mo}$ .....	30
3.3.8. Aktivitas $^{99}\text{Mo}$ .....	31
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	32
4.1. Geometri Aqueous Homogeneous Reactor (AHR).....	32
4.2. Validasi Input AHR.....	34
4.3. <i>Parametric Study</i> Penentuan Jumlah Neutron .....	35
4.4. Hasil Perhitungan $k_{eff}$ AHR dengan Variasi Pengayaan $^{235}\text{U}$ .....	36
4.5. Produksi $^{99}\text{Mo}$ dengan Variasi <i>Time Step Burn-Up</i> AHR.....	38
4.6. Peluruhan $^{99}\text{Mo}$ .....	40
<b>BAB V PENUTUP</b> .....	42
5.1. Kesimpulan .....	42
5.2. Saran.....	42
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	43
<b>LAMPIRAN</b> .....	46

## DAFTAR TABEL

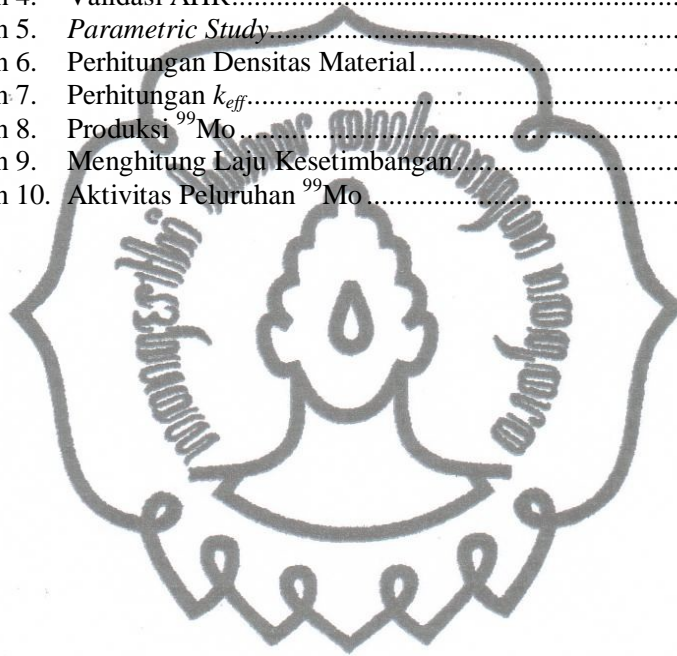
Tabel 3.1.	Parameter AHR.....	28
Tabel 4.1.	Hasil validasi input AHR.....	34
Tabel I.1.	Kode <i>Surface</i> MCNPX.....	46
Tabel IV.1.	Parameter AHR yang divalidasi.....	55
Tabel IV.2.	Listing input AHR penelitian dengan referensi .....	56
Tabel V.1.	Hasil $k_{eff}$ <i>parametric study</i> .....	58
Tabel VI.1.	Densitas atom penyusun material larutan campuran bahan bakar dan moderator.....	64
Tabel VII.1.	Hasil perhitungan $k_{eff}$ .....	65
Tabel VIII.1.	Produksi $^{99}\text{Mo}$ .....	66
Tabel IX.1.	Menghitung laju produksi $^{99}\text{Mo}$ .....	67
Tabel IX.2.	Menghitung jumlah atom $^{99}\text{Mo}$ .....	68
Tabel X.1.	Aktivitas peluruhan $^{99}\text{Mo}$ .....	69

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1.	Skema tampang lintang neutron.....	8
Gambar 2.2.	Perbandingan spektrum fluks neutron pada reaktor termal dan reaktor pembiak .....	10
Gambar 2.3.	Salah satu model geometri AHR.....	12
Gambar 2.4.	Perbandingan grafik tampang lintang dari material $^{12}\text{C}$ dan $^9\text{Be}$ pada rentang energi neutron termal.....	15
Gambar 2.5.	Hasil fisi $^{235}\text{U}$ pada energi termal .....	19
Gambar 2.6.	Skema peluruhan isotop $^{99}\text{Mo}$ menjadi isotop $^{99}\text{Ru}$ yang melalui isotop $^{99}\text{Te}$ .....	20
Gambar 2.7.	Grafik total produksi dan kesetimbangan radioisotop .....	22
Gambar 4.1.	Geometri AHR .....	32
Gambar 4.2.	Kajian penentuan jumlah neutron yang disimulasikan .....	35
Gambar 4.3.	Grafik perubahan nilai $k_{eff}$ dengan variasi pengayaan $^{235}\text{U}$ .....	37
Gambar 4.4.	Grafik penambahan aktivitas $^{99}\text{Mo}$ .....	38
Gambar 4.5.	Grafik penambahan massa $^{99}\text{Mo}$ .....	39
Gambar 4.6.	Grafik akumulasi dan kesetimbangan produksi inti $^{99}\text{Mo}$ .....	40
Gambar 4.7.	Grafik peluruhan $^{99}\text{Mo}$ selama 6 hari.....	41
Gambar II.1.	Input file perhitungan $k_{eff}$ .....	47
Gambar II.2.	Data card.....	49
Gambar II.3.	<i>Running</i> dengan vised .....	50
Gambar II.4.	<i>Batch</i> file .....	50
Gambar II.5.	<i>Running</i> dengan Total Commander .....	51
Gambar II.6.	Format output $k_{eff}$ .....	51
Gambar II.7.	Input <i>burn-up</i> .....	52
Gambar II.8.	Output produksi $^{99}\text{Mo}$ .....	53

**DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran 1.	MCNPX <i>Surface Card</i> .....	46
Lampiran 2.	Metode Penggunaan MCNPX .....	47
Lampiran 3.	Listing Input Geometri AHR .....	54
Lampiran 4.	Validasi AHR .....	55
Lampiran 5.	<i>Parametric Study</i> .....	57
Lampiran 6.	Perhitungan Densitas Material .....	59
Lampiran 7.	Perhitungan $k_{eff}$ .....	65
Lampiran 8.	Produksi $^{99}\text{Mo}$ .....	66
Lampiran 9.	Menghitung Laju Kesetimbangan .....	67
Lampiran 10.	Aktivitas Peluruhan $^{99}\text{Mo}$ .....	69



## DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan	Nilai atau satuan
$N$	Densitas atom	atom/cc
$N_A$	Bilangan Avogadro	$6,02 \times 10^{23}$ atom/mol
$A$	Massa atom	amu
$\bar{A}$	Massa atom rata-rata	amu
$w_f$	Fraksi berat	-
$a_f$	Fraksi atom	-
$\sigma$	Tampang lintang mikroskopis	barn
$\Sigma$	Tampang lintang makroskopis	$\text{cm}^{-1}$
$k_{eff}$	Kritikalitas	-