

EVALUASI KESELAMATAN REAKTOR DITINJAU DARI NILAI  
*SHUTDOWN MARGIN* DAN POTENSI PRODUKSI  
*MOLYBDENUM-99 (<sup>99</sup>Mo)* PADA SISTEM *SUBCRITICAL*  
*ASSEMBLY FOR <sup>99</sup>Mo PRODUCTION (SAMOP)*



**YUNITA ANGGRAINI**

**M0213102**

**SKRIPSI**

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

**PROGRAM STUDI FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS SEBELAS MARET SURAKARTA**

**Juni 2017**

## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi dengan judul : Evaluasi Keselamatan Reaktor Ditinjau dari Nilai *Shutdown Margin* dan Potensi Produksi Mo-99 pada Sistem *Subcritical Assembly for Mo-99 Production* (SAMOP)

Yang ditulis oleh :

Nama : Yunita Anggraini

NIM : M0213102

Telah diuji dan dinyatakan lulus oleh dewan penguji pada:

Hari : Selasa

Tanggal : 20 Juni 2017

Dewan Penguji :

1. Ketua Penguji  
Dra. Suharyana, M.Sc  
NIP. 19611217 198903 1 003
2. Sekertaris Penguji  
Dr. Fuad Anwar, S.Si., M.Si  
NIP. 19700610 200003 1 001
3. Anggota Penguji 1  
Dra. Riyatun, M.Si  
NIP. 19680226 199402 2 001
4. Anggota Penguji 2  
Dr. Azizul Khakim, S.T., M.Eng  
NIP. 19711224 199912 1 001

  
.....  
  
.....  
  
.....  
  
..... 21 Juni 2017

Disahkan pada tanggal 10-07-2017

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 “EVALUASI KESELAMATAN REAKTOR DITINJAU DARI NILAI *SHUTDOWN MARGINS* DAN POTENSI PRODUKSI *MOLYBDENUM-99* ( $^{99}\text{Mo}$ ) PADA SISTEM *SUBCRITICAL ASSEMBLY FOR  $^{99}\text{Mo}$  PRODUCTION* (SAMOP)” adalah hasil kerja saya dan sepengetahuan saya hingga saat ini isi Skripsi tidak berisi materi y

ang telah dipublikasi atau ditulis oleh orang lain atau materi yang telah diajukan untuk mendapatkan 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 diphotocopy secara bebas tanpa harus memberitahu penulis.

Surakarta, 4-6-2017

YUNITA ANGGRAINI

## **MOTTO**

“ Bila kaum muda yang telah belajar di sekolah dan menganggap dirinya terlalu tinggi serta pintar untuk melebur dengan masyarakat yang bekerja dengan cangkul dan hanya memiliki cita-cita yang sederhana, maka lebih baik pendidikan itu tidak diberikan sama sekali.”

(Tan Malaka)

“Tujuan pendidikan itu untuk mempertajam kecerdasan, memperkuat kemauan serta memperhalus perasaan.”

(Tan Malaka)

Man Jadda Wa Jadda

## **PERSEMBAHAN**

Dengan penuh rasa syukur kepada Allah SWT, karya ini saya persembahkan kepada :

1. Ibuk, Bapak, Adik, Alm. Bapak Manan, Kakek, Nenek, atas doa, semangat dan motivasi yang selalu diberikan untuk kelancaran kuliah dan pembuatan tugas akhir saya.
2. Seluruh keluarga besar saya, yang juga memberikan semangat, dukungan dan doa untuk kelancaran kuliah saya.
3. Ibu Riyatun, Bapak Suharyana, Bapak Azizul Khakim, Bapak Fuad Anwar beserta Group Riset Nuklir dan Radiasi yang telah bersedia berbagi ilmu dan pengalaman.
4. Pembimbing akademik, Bapak Mohtar Yunianto yang selalu memberikan dorongan dan nasehat.
5. Villian Dwi Prakoso atas motivasi dan semangatnya.
6. Teman – teman Kost Inori Putri 1 atas bantuan, doa, dan motivasi sejak awal saya tinggal di kost sampai pembuatan tugas akhir.
7. Bapak/Ibu guru beserta teman – teman sekolah alumni RA Taufiqiyatul Asna, SDN Keling 2, SMPN 2 Kepung, SMAN 1 Pare yang masih setia memberikan dukungan dan motivasi untuk kelancaran kuliah saya.
8. Ajeng, Intan, Septi, Firda, Esti, Rara, Uswa, Jakiyah, Kiki, dan seluruh teman-teman FISIKA FMIPA UNS angkatan 2013.
9. Mbak Octa yang telah memberikan pelatihan MCNPX.
10. Keluarga besar Thong-Thong (Irma, Tipung, Maya, Revi, Nur Intan, Ika, Elsa, Vinta)
11. Keluarga besar FISIKA FMIPA UNS.

**Evaluasi Keselamatan Reaktor Ditinjau dari Nilai *Shutdown Margins* dan Potensi Produksi *Molybdenum-99* ( $^{99}\text{Mo}$ ) pada Sistem *Subcritical Assembly for  $^{99}\text{Mo}$  Production* (SAMOP)**

YUNITA ANGGRAINI

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

**ABSTRAK**

Telah dilaksanakan penelitian dengan memanfaatkan *software Monte Carlo Nano Particle eXtended Version* (MCNPX) untuk memodelkan dan mensimulasikan teras reaktor SAMOP. Geometri teras reaktor yang dimodelkan mengacu pada proyek pengembangan SAMOP oleh P2STPIBN BAPETEN dengan volume teras 55,094 liter. Sebanyak 24,3 liter bahan uranil nitrat ( $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ ) dengan pengayaan  $^{235}\text{U}$  tetap sebesar 19,75% divariasikan konsentrasi uranium (100-500) g/l. Air dalam larutan uranil nitrat sekaligus sebagai moderator. Air juga digunakan sebagai pendingin yang berada diluar teras reaktor. Batang kendali terbuat dari boron karbida ( $\text{B}_4\text{C}$ ) dan reflektor berupa grafit. Reaktor dioperasikan pada daya 600 watt. Hasil dari penelitian ini adalah: (1) Nilai  $k_{eff}$  sebesar 0,99 dihasilkan pada konsentrasi uranium 300 g/l, (2) Reaktor dengan konsentrasi 300 g/l berada pada kondisi aman ditinjau dari nilai *shutdown margin*, (3) Desain SAMOP pada hari ke-5 *burn-up* menghasilkan aktivitas  $^{99}\text{Mo}$  sebesar 22 Ci.

**Kata Kunci:** SAMOP, *shutdown margin*, MCNPX

***Evaluation of Reactor Safety Viewed from Shutdown Margins Value and Potential Production of Molybdenum-99 (<sup>99</sup>Mo) on the Subcritical Assembly for <sup>99</sup>Mo Production (SAMOP) System***

YUNITA ANGGRAINI

*Physics Departement, Faculty of Mathematics and Natural Sciences  
Sebelas Maret University*

**ABSTRACT**

*Research has been conducted using Monte Carlo Nano Particle eXtended Version (MCNPX) software to model and simulate SAMOP reactor core. A geometry of reactor core is modeled refers to the SAMOP development project by P2STPIBN BAPETEN. A total of 24.3 liters of uranyl nitrate material with U-235 enrichment 19.75% is varied in concentration of uranium (100-500) g/l. The SAMOP reactor uses water as a moderator that mixed with fuel. Water is also used as a coolant that is outside of reactor core. The control rod is made of boron carbide (B<sub>4</sub>C) and the reflector is graphite. The reactor is operated on power 600 watt. The results of this study are: (1) The  $k_{eff}$  value of 0.99 is produced at a concentration of uranium 300 g/l, (2) Reactor with concentration 300 g/l is in safe condition when viewed from the shutdown margin value, (3) Design SAMOP on the 5<sup>th</sup> day of burn-up generates a <sup>99</sup>Mo activity of 22 Ci.*

**Keywords:** SAMOP, shutdown margin, MCNPX

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT atas segala limpahan nikmat dan karuniaNya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan Skripsi. Sholawat dan salam senantiasa penulis haturkan kepada Rosulullah SAW sebagai pembimbing seluruh umat manusia.

Skripsi yang penulis susun sebagai bagian dari syarat untuk mendapatkan gelar Sarjana Sains ini penulis beri judul “Evaluasi Keselamatan Reaktor Ditinjau dari Nilai *Shutdown Margins* dan Potensi Produksi *Molybdenum-99* ( $^{99}\text{Mo}$ ) pada Sistem *Subcritical Assembly for  $^{99}\text{Mo}$  Production* (SAMOP)”. terselesaikannya Skripsi ini adalah suatu kebahagiaan bagi saya. Setelah satu semester penulis harus berjuang untuk bisa menyelesaikan Skripsi ini tepat waktu. Dengan segala suka dan sukanya, pada akhirnya Skripsi ini terselesaikan juga. Kepada berbagai pihak yang telah membantu penulis menyelesaikan Skripsi ini penulis ucapkan terima kasih. Atas bantuannya yang sangat besar selama proses pengerjaan Skripsi ini, ucapan terima kasih secara khusus penulis sampaikan kepada:

1. Dra. Riyatun M.Si. selaku pembimbing I
2. Dr. Azizul Khakim, S.T., M.Eng. selaku pembimbing II
3. Drs Suharyana, M.Sc. selaku pembimbing Group Riset Nuklir dan Radiasi
4. Rekan – rekan dalam Group Riset Nuklir dan Radiasi

Semoga Allah SWT membalas jerih payah dan pengorbanan yang telah diberikan dengan balasan yang lebih baik. Amiin.

Penulis menyadari akan banyaknya kekurangan dalam penulisan Skripsi ini. Namun demikian, penulis berharap semoga karya kecil ini bermanfaat.

Surakarta, 4 Juni 2017

Yunita Anggraini



## HALAMAN PUBLIKASI

No	Judul	Penulis	Jenis Publikasi
1	Potensi Produksi <sup>99</sup> Mo pada Reaktor Sistem <i>Subcritical Assembly for Molybdenum-99 Production</i> (SAMOP)	Yunita Anggraini, Riyatun, Azizul Khakim	Repository Perpustakaan Pusat Universitas Sebelas Maret Surakarta
2	Evaluasi Keselamatan Reaktor Ditinjau dari Nilai <i>Shutdown Margin</i> pada Sistem <i>Subcritical Assembly for Molybdenum-99 Production</i> (SAMOP)	Yunita Anggraini, Riyatun, Azizul Khakim, Suharyana	Seminar Keselamatan Nuklir (SKN) BAPETEN 2017, Yogyakarta 1 Agustus 2017 (Poster)

## DAFTAR ISI

	Halaman
<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 ABSTRACT</b> .....	vi
<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. ....	Batas
an Masalah .....	4
1.3. ....	Peru
musan Masalah .....	5
1.4. ....	Tujua
n Penelitian .....	5
1.5. ....	Manf
aat Penelitian.....	5
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	6
2.1. BAPETEN .....	6
2.1.1. Tugas Pokok .....	6
2.1.2. Fungsi.....	6
2.2. Radioisotop dalam Bidang Kedokteran .....	7
2.3. SAMOP dalam AHR .....	7
2.3.1. Bahan Bakar.....	8
2.3.2. Batang Kendali .....	9
2.3.3. Reflektor .....	9
2.3.4. Moderator.....	10
2.3.5. Sistem Pendingin .....	10
2.3.6. Sistem Manajemen Gas .....	10
2.4. Fisi .....	10
2.5. Isotop <sup>99</sup> Mo Sebagai Produk Fisi .....	11
2.6. Tampang Lintang .....	13
2.7. Faktor Pelipatan Efektif .....	14
2.8. Reaktivitas .....	17

2.8.1. Reaktivitas Lebih Teras .....	18
2.8.2. Reaktivitas Positif Lainnya .....	19
2.8.3 Hubungan Reaktivitas dengan $K_{eff}$ .....	19
2.9. Fungsi Dasar Keselamatan Reaktor .....	20
2.10. <i>Shutdown Margins</i> .....	20
2.11. Laju Produksi dan Peluruhan Radioaktif .....	21
2.12. <i>Monte Carlo N Particle version X (MCNP-X)</i> .....	24
2.12.1. Input MCNPX .....	25
2.12.2. Perhitungan Kekritisan dalam MCNPX .....	27
2.12.3 Estimator Tumbukan .....	27
2.12.4. Estimator Serapan .....	27
2.12.5. Estimator Panjang Jejak .....	27
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b> .....	29
3.1. Tempat dan Waktu Penelitian .....	29
3.2. Alat dan Bahan .....	29
3.3. Prosedur Penelitian .....	30
3.3.1. Input Geometri dan Material .....	30
3.3.2. Variasi Konsentrasi Larutan Uranil Nitrat .....	34
3.3.3. Perhitungan $k_{eff}$ Saat Batang Kendali Disisipkan .....	34
3.3.4. Perhitungan <i>Shutdown Margin</i> .....	34
3.3.5. Perhitungan <i>Burn-up</i> .....	34
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	35
4.1. Geometri Teras Reaktor SAMOP .....	35
4.2. <i>Parameter Study</i> Penentuan Jumlah Neutron .....	36
4.3. Nilai $k_{eff}$ dari Variasi Konsentrasi Uranil Nitrat .....	37
4.4. Nilai $k_{eff}$ Ketika Batang Kendali Disisipkan .....	39
4.5. Perhitungan Reaktivitas .....	41
4.6. Perhitungan <i>Shutdown Margin</i> .....	41
4.7. Karakteristik SAMOP .....	42
4.8. Produksi $^{99}\text{Mo}$ dari Hasil <i>Burn-up</i> .....	43
<b>BAB V PENUTUP</b> .....	46
5.1. Kesimpulan .....	46
5.2. Saran .....	46
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	47
<b>LAMPIRAN</b> .....	49

## DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1. Tampang lintang isotope terhadap neutron termal.....	15
Tabel 2.2. Tampang lintang material moderator dan reflektor. ....	15
Tabel 3.1. Susunan input teras reaktor .....	31
Tabel 4.1. Nilai $k_{eff}$ pada beberapa variasi nsrck.....	37
Tabel 4.2. Nilai $k_{eff}$ dari variasi konsentrasi uranium.....	37
Tabel 4.3 Nilai $k_{eff}$ setelah batang kendali dimasukkan .....	40
Tabel 4.5. Nilai reaktivitas teras reaktor SAMOP .....	41
Tabel 4.6. Nilai <i>shutdown margin</i> teras reaktor SAMOP .....	42
Tabel 4.7. Karakteristik SAMOP .....	43
Tabel II.1 <i>Surface card code</i> .....	50
Tabel II.2. Densitas atom penyusun material.....	57
Tabel II.3. Aktivitas $^{99}\text{Mo}$ setelah proses <i>burn-up</i> .....	61
Tabel II.4. Aktivitas peluruhan $^{99}\text{Mo}$ .....	62

## DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1. Konstruksi sistem SAMOP .....	8
Gambar 2.2 Hasil fisi $^{235}\text{U}$ pada energi termal.....	11
Gambar 2.3. Peluruhan radioisotop dari $^{99}\text{Mo}$ .....	12
Gambar 2.4 Skema tampang lintang neutron.....	13
Gambar 2.5. Siklus hidup neutron dalam reaktor nuklir.....	16
Gambar 2.6. Grafik total produksi dan kesetimbangan radioisotop .....	24
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.....	30
Gambar 3.2. Skema rancangan teras SAMOP .....	32
Gambar 3.3. Bentuk rancangan 3-D teras SAMOP .....	33
Gambar 4.1. Geometri SAMOP dalam <i>vised</i> .....	35
Gambar 4.2. Geometri sebelum dan sesudah ada batang kendali .....	39
Gambar 4.3. Grafik hubungan aktivitas $^{99}\text{Mo}$ dan pertambahan hari .....	40
Gambar II.1. Input Program .....	53
Gambar II.2. Nilai $k_{eff}$ hasil running.....	53
Gambar II.3. Input <i>burn-up</i> .....	54
Gambar II.4. Membaca <i>output burn-up</i> .....	56

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. MCNPX <i>Surface Card</i> .....	50
Lampiran 2. Metode Pembuatan Input MCNPX .....	51
Lampiran 3. Perhitungan Densitas Material .....	57
Lampiran 4. Aktivitas <sup>99</sup> Mo Setelah Proses <i>Burn-up</i> .....	61
Lampiran 5 Aktivitas Peluruhan <sup>99</sup> Mo .....	62

## DAFTAR SIMBOL

$k_{eff}$	:	Faktor multiplikasi efektif
$t_{1/2}$	:	Waktu paruh
$m_n$	:	Massa neutron
$\varepsilon$	:	Faktor fisi cepat
$\mathcal{L}_f$	:	Faktor ketidkebocoran neutron cepat
$p$	:	Probabilitas lolos resonansi
$\mathcal{L}_t$	:	Faktor ketidkebocoran neutron cepat
$f$	:	Faktor utilitas termal
$\eta$	:	Faktor reproduksi
$\rho$	:	Reaktivitas
$n$	:	Neutron, nomor generasi
$N_n$	:	Jumlah neutron pada generasi ke $n$
$N_0$	:	Jumlah elektron mula-mula pada generasi pertama
$R$	:	Laju reaksi
$\phi$	:	Fluks neutron
N	:	Nitrogen
S	:	Sulfur
$N$	:	Densitas atom, cacah neutron, jumlah inti
$A$	:	Aktivitas radioaktif, luasan
$\lambda$	:	Konstanta peluruhan

$R$	:	Laju produksi radioisotop
$\sigma$	:	tampang lintang mikroskopis
$\sigma_a$	:	Tampang lintang serapan
$\sigma_s$	:	Tampang lintang hamburan
$\sigma_f$	:	Tampang lintang fisi
$\sigma_t$	:	Tampang lintang mikroskopis total
$\Sigma$	:	Tampang lintang makroskopis
$\Sigma_i$	:	Tampang lintang makroskopis total
$I$	:	Intensitas neutron
$v$	:	Kecepatan
$X$	:	Tebal
$u$	:	Satuan massa atom
$k_{eff}^c$	:	Estimator tumbukan
$k_{eff}^A$	:	Estimator serapan
$k_{eff}^{TL}$	:	Estimator panjang jejak