

**VALIDASI NILAI KOEFISIEN REAKTIVITAS
NEGATIF SUHU BAHAN BAKAR REAKTOR
KARTINI DENGAN *SOFTWARE* MCNP-6**

TUGAS AKHIR

Untuk memenuhi sebagian persyaratan mencapai derajat Sarjana S-1

Program Studi Fisika



diajukan oleh :

Zulfa Shobriyyah

18106020047

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UIN SUNAN KALIJAGA**

YOGYAKARTA

2024

HALAMAN PENGESAHAN



KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI SUNAN KALIJAGA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
Jl. Marsda Adisucipto Telp. (0274) 540971 Fax. (0274) 519739 Yogyakarta 55281

PENGESAHAN TUGAS AKHIR

Nomor : B-1980/Un.02/DST/PP.00.9/10/2024

Tugas Akhir dengan judul : Validasi Nilai Koefisien Reaktivitas Negatif Suhu Bahan Bakar Reaktor Kartini dengan Software MCNP-6

yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Nama : ZULFA SHOBRIYYAH
Nomor Induk Mahasiswa : 18106020047
Telah diujikan pada : Kamis, 26 September 2024
Nilai ujian Tugas Akhir : A

dinyatakan telah diterima oleh Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta

TIM UJIAN TUGAS AKHIR



Ketua Sidang

Dr. Nita Handayani, S.Si, M.Si
SIGNED

Valid ID: 6719fa6779776



Penguji I

Anis Yuniati, S.Si., M.Si., Ph.D.
SIGNED

Valid ID: 671983aacc46



Penguji II

Dr. Asih Melati, S.Si., M.Sc.
SIGNED

Valid ID: 671e5ade7de9



Yogyakarta, 26 September 2024
UIN Sunan Kalijaga
Dekan Fakultas Sains dan Teknologi

Prof. Dr. Dra. Hj. Khurul Wardati, M.Si.
SIGNED

Valid ID: 6720ca7489781

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Zulfa Shobriyyah
NIM : 18106020047
Program Studi : Fisika
Fakultas : Sains dan Teknologi

Menyatakan bahwa skripsi saya yang berjudul “Validasi Nilai Koefisien Reaktivitas Negatif Suhu Bahan Bakar Reaktor Kartini Dengan *Software* MCNP-6” merupakan hasil penelitian saya sendiri, tidak terdapat karya yang pernah diajukan untuk memperoleh gelar kesarjanaan di suatu perguruan tinggi, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan orang lain kecuali yang secara tertulis diacu dalam naskah ini dan disebutkan dalam daftar pustaka.

Yogyakarta, 13 September 2024
Penulis


10000
814DCALX242093144
Zulfa Shobriyyah
NIM. 18106020047

HALAMAN PERSETUJUAN SKRIPSI

HALAMAN PERSETUJUAN SKRIPSI



Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga



FM-UINSK-BM-05-03/R0

SURAT PERSETUJUAN SKRIPSI/TUGAS AKHIR

Hal : Persetujuan skripsi
Lamp : -

Kepada
Yth. Dekan Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta
di Yogyakarta

Assalamualaikum. Wr. Wb.

Setelah membaca, meneliti, memberikan petunjuk dan mengoreksi serta mengadakan perbaikan seperlunya, maka kami selaku pembimbing berpendapat bahwa skripsi Saudara:

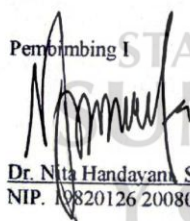
Nama : ZULFA SHOBRIYYAH
NIM : 18106020047
Judul Skripsi : VALIDASI NILAI KOEFISIEN REAKTIVITAS NEGATIF SUHU BAHAN BAKAR
REAKTOR KARTINI DENGAN *SOFTWARE* MCNP-6

sudah dapat diajukan kembali kepada Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Strata Satu dalam bidang Fisika.

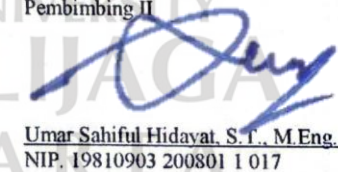
Dengan ini kami berharap agar skripsi/tugas akhir Saudara tersebut di atas dapat segera dimunaqsyahkan. Atas perhatiannya kami ucapkan terima kasih.

Wassalamualaikum. Wr. Wb.

Pembimbing I


Dr. Nita Handayani, S.Si., M.Si.
NIP. 19820126 200801 2 008

Yogyakarta, 13 September 2024
Pembimbing II


Umar Sahiful Hidayat, S.T., M.Eng.
NIP. 19810903 200801 1 017

VALIDASI NILAI KOEFISIEN REAKTIVITAS NEGATIF SUHU BAHAN BAKAR REAKTOR KARTINI DENGAN SOFTWARE MCNP-6

Zulfa Shobriyyah
18106020047

INTISARI

Reaktivitas merupakan salah satu parameter penting dalam pengoperasian reaktor, dimana reaktivitas mempengaruhi keselamatan reaktor. Perubahan pada reaktivitas yang disebabkan oleh suhu bahan bakar disebut dengan koefisien reaktivitas suhu bahan bakar. Telah dilakukan validasi nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar pada reaktor Kartini. Penelitian ini bertujuan menganalisis nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar hasil simulasi dan memvalidasi nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar hasil eksperimen dengan hasil simulasi. Nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar didapatkan dari hasil simulasi menggunakan *software* MCNP-6 dengan TRIGA-MCNP sebagai *software* pendukung untuk membuat *file input*. Terdapat tiga variasi yang digunakan, antara lain variasi posisi batang kendali pengatur, batang kendali kompensasi, dan variasi kombinasi kedua batang kendali tersebut. Hasil penelitian ini diperoleh nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar hasil eksperimen sebesar 0,72 cent/°C, 0,78 cent/°C, 0,74 cent/°C, 0,77 cent/°C, dan 0,78 cent/°C untuk variasi posisi batang kendali pengatur, 0,94 cent/°C, 0,95 cent/°C, 0,71 cent/°C, 0,76 cent/°C, dan 0,59 cent/°C untuk variasi posisi batang kendali kompensasi, 0,91 cent/°C, 0,83 cent/°C, 0,69 cent/°C, 0,73 cent/°C, dan 1,60 cent/°C untuk variasi kombinasi kedua batang kendali tersebut. Sedangkan nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar hasil simulasi diperoleh sebesar 0,46 cent/°C, 0,39 cent/°C, 0,69 cent/°C, 0,77 cent/°C, dan 0,57 cent/°C untuk variasi posisi batang kendali pengatur, 1,77 cent/°C, 1,45 cent/°C, 1,33 cent/°C, 1,87 cent/°C, dan 1,55 cent/°C untuk variasi posisi batang kendali kompensasi, 1,16 cent/°C, 0,72 cent/°C, 0,83 cent/°C, 0,94 cent/°C, dan 2,32 cent/°C untuk variasi kombinasi kedua batang kendali tersebut. Perbedaan antara hasil eksperimen dan hasil simulasi divalidasi dengan uji statistik *Mann-Whitney*, dari uji tersebut diperoleh kesimpulan bahwa tidak terdapat perbedaan yang signifikan antara hasil simulasi koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar reaktor Kartini dengan MCNP-6 dan hasil eksperimen.

Kata Kunci : Koefisien Reaktivitas, Suhu Bahan Bakar, Batang Kendali, Reaktor Kartini, MCNP-6

VALIDATION OF THE NEGATIVE FUEL TEMPERATURE REACTIVITY COEFFICIENT FOR THE KARTINI REACTOR USING MCNP-6

SOFTWARE

Zulfa Shobriyyah
18106020047

ABSTRACT

Reactivity is one of the important parameters in reactor operation, as it affects reactor safety. Changes in reactivity caused by fuel temperature are referred to as the fuel temperature reactivity coefficient. Validation of the negative fuel temperature reactivity coefficient value has been carried out on the Kartini reactor. This study aims to analyze the value of the negative fuel temperature reactivity coefficient from simulations and validate the experimental negative fuel temperature reactivity coefficient with the simulation results. The negative fuel temperature reactivity coefficient is obtained from simulation results using the MCNP-6 software, with TRIGA-MCNP as a supporting software for creating input files. Three variations were used, including variations in the positions of the control rods, compensation rods, and combinations of these two control rods. The experimental results showed negative fuel temperature reactivity coefficient values of 0,72 cent/°C, 0,78 cent/°C, 0,74 cent/°C, 0,77 cent/°C, and 0,78 cent/°C for control rod position variations, 0,94 cent/°C, 0,95 cent/°C, 0,71 cent/°C, 0,76 cent/°C, and 0,59 cent/°C for compensation rod position variations, and 0,91 cent/°C, 0,83 cent/°C, 0,69 cent/°C, 0,73 cent/°C, and 1,60 cent/°C for combinations of both control rods. Meanwhile, the simulated values of the negative fuel temperature reactivity coefficient were 0,46 cent/°C, 0,39 cent/°C, 0,69 cent/°C, 0,77 cent/°C, and 0,57 cent/°C for control rod position variations, 1,77 cent/°C, 1,45 cent/°C, 1,33 cent/°C, 1,87 cent/°C, and 1,55 cent/°C for compensation rod position variations, and 1,16 cent/°C, 0,72 cent/°C, 0,83 cent/°C, 0,94 cent/°C, and 2,32 cent/°C for combinations of both control rods. The difference between the experimental and simulated results was validated using the Mann-Whitney statistical test, and the conclusion from this test was that there is no significant difference between the simulation results of the negative fuel temperature reactivity coefficient of the Kartini reactor using MCNP-6 and the experimental results.

Keyword : Reactivity Coefficient, Fuel Temperature, Control Rod, Kartini Reactor, MCNP-6

MOTTO DAN PERSEMBAHAN

Motto

Terkadang, kesulitan harus kamu rasakan terlebih dahulu sebelum kebahagiaan yang sempurna datang kepadamu

-R. A. Kartini-

Menuntut ilmu adalah takwa. Menyampaikan ilmu adalah ibadah. Mengulang-ulang ilmu adalah dzikir. Mencari ilmu adalah jihad.

-Imam Al Ghazali-

No Limit Gon' Touch The Sky

-iKON-

Persembahan

Tugas akhir ini penulis persembahkan untuk :

Bapak (Marjoko) dan Umi (Sularmi)

Adikku (Anwar Fauzi)

Seluruh keluargaku

Ibu Dr. Nita Handayani, S. Si., M. Si.

Bapak Umar Sahiful Hidayat, S. T., M. Eng.

Dan seluruh pihak yang mendukung, memberi semangat, serta mendoakan.

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur atas kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan karunia-Nya sehingga penulis dapat melaksanakan penelitian dan menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Validasi Nilai Koefisien Reaktivitas Negatif Suhu Bahan Bakar Reaktor Kartini dengan *Software* MCNP-6” dengan baik. Shalawat dan salam semoga tetap tercurah dan terlimpahkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah memberikan teladan serta syafaat bagi umatnya.

Penyelesaian tugas akhir ini tidak lepas dari bimbingan, bantuan, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Ibu Anis Yuniati, Ph.D., selaku Kepala Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
2. Ibu Dr. Nita Handayani, M.Si., selaku dosen pembimbing tugas akhir dan dosen pembimbing akademik.
3. Bapak Umar Sahiful Hidayat, M.Eng., selaku pembimbing penelitian di KSE Achmad Baiquni BRIN Babarsari Yogyakarta.
4. Bapak Fajar Arianto, M.Si., selaku dosen yang telah membimbing dan memberikan ilmunya.
5. Bapak dan Ibu dosen Program Studi Fisika UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
6. Kedua orang tua, adik, dan juga seluruh keluarga besar yang selalu memberikan do'a dan dukungan.

7. Nisa, Dita, Yulia, Nurul, dan teman-teman lain yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang menemani dan memberikan dukungan.
8. Tika, Nurul, Diaz, Dani, Samuel, Dendri, teman-teman “Magang BRIN” yang menemani dan memberikan motivasi selama melakukan penelitian.
9. Seluruh karyawan dan staff KSE Achmad Baiquni BRIN Babarsari Yogyakarta yang banyak membantu penulis selama penelitian.
10. Teman-teman Fisika 2018 UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta.
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah mengajarkan serta mendukung penulis.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan tugas akhir ini masih terdapat banyak kekurangan dan jauh dari kesempurnaan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun sebagai perbaikan pada karya di masa mendatang.

Wassalamualaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Yogyakarta, 13 September 2024

Penulis

STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN	iii
HALAMAN PERSETUJUAN SKRIPSI	iv
INTISARI	v
ABSTRACT	vi
MOTTO DAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR.....	viii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiv
DAFTAR LAMPIRAN	xvi
DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN	xvii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	8
1.3 Tujuan Penelitian	8
1.4 Batasan Penelitian.....	9
1.5 Manfaat Penelitian	9
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Studi Pustaka	10
2.2 Landasan Teori.....	17
2.2.1 Reaksi Fisi.....	17
2.2.2 Reaktor Nuklir	20
2.2.3 Reaktor Kartini.....	29
2.2.4 Bahan Bakar Reaktor Kartini.....	42
2.2.5 Koefisien Reaktivitas Suhu Bahan Bakar	44
2.2.6 Pengendalian Keselamatan Reaktor Nuklir	50

2.2.7	Uji Statistik <i>Mann-Whitney</i>	55
2.2.8	<i>Software</i> MCNP-6.....	58
2.2.9	<i>Software</i> SPSS	60
BAB III METODE PENELITIAN		63
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian.....	63
3.2	Alat dan Bahan Penelitian.....	63
3.3	Prosedur Penelitian	64
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		77
4.1	Hasil Penelitian	77
4.1.1	Metode Eksperimen	77
4.1.2	Metode Simulasi	82
4.1.3	Validasi Hasil.....	87
4.2	Pembahasan	88
4.2.1	Kalibrasi Batang Kendali	88
4.2.2	Suhu Bahan Bakar dan Posisi Batang Kendali	90
4.2.3	Reaktivitas.....	92
4.2.4	Koefisien Reaktivitas Negatif Suhu Bahan Bakar	92
4.2.5	Validasi Hasil.....	96
BAB V PENUTUP		98
5.1	Kesimpulan.....	98
5.2	Saran.....	99
DAFTAR PUSTAKA		100
LAMPIRAN.....		105

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Beberapa penelitian rujukan pada penelitian tugas akhir	16
Tabel 2.2	Dimensi kisi reaktor TRIGA Mark II	42
Tabel 3.1	Alat penelitian	63
Tabel 3.2	Tabel hasil pengolahan data untuk koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar reaktor Kartini variasi posisi batang kendali pengatur	75
Tabel 3.3	Tabel hasil pengolahan data untuk koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar reaktor Kartini variasi posisi batang kendali kompensasi	75
Tabel 3.4	Tabel hasil pengolahan data untuk koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar reaktor Kartini variasi kombinasi posisi batang kendali pengatur dan kompensasi.....	75
Tabel 4.1	Hasil perhitungan reaktivitas untuk batang kendali pengatur eksperimen.....	78
Tabel 4.2	Hasil perhitungan reaktivitas untuk batang kendali kompensasi eksperimen.....	79
Tabel 4.3	Suhu bahan bakar dan posisi batang kendali pengatur hasil eksperimen.....	80
Tabel 4.4	Suhu bahan bakar dan posisi batang kendali kompensasi hasil eksperimen.....	80
Tabel 4.5	Suhu bahan bakar dan posisi batang kendali variasi kombinasi batang kendali pengatur dan batang kendali kompensasi hasil eksperimen.....	80
Tabel 4.6	Nilai reaktivitas dengan variasi batang kendali pengatur hasil eksperimen.....	81
Tabel 4.7	Nilai reaktivitas dengan variasi batang kendali kompensasi hasil eksperimen.....	81

Tabel 4.8	Nilai reaktivitas dengan variasi kombinasi batang kendali pengatur dan batang kendali kompensasi hasil eksperimen	82
Tabel 4.9	Nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar reaktor Kartini hasil eksperimen	82
Tabel 4.10	Hasil perhitungan reaktivitas untuk batang kendali pengatur simulasi.....	83
Tabel 4.11	Hasil perhitungan reaktivitas untuk batang kendali kompensasi simulasi.....	84
Tabel 4.12	Suhu bahan bakar dan posisi batang kendali pengatur hasil simulasi	85
Tabel 4.13	Suhu bahan bakar dan posisi batang kendali kompensasi hasil simulasi.....	85
Tabel 4.14	Suhu bahan bakar dan posisi batang kendali variasi kombinasi batang kendali pengatur dan batang kendali kompensasi hasil simulasi.....	86
Tabel 4.15	Nilai reaktivitas dengan variasi batang kendali pengatur hasil simulasi.....	86
Tabel 4.16	Nilai reaktivitas dengan variasi batang kendali kompensasi hasil simulasi.....	86
Tabel 4.17	Nilai reaktivitas dengan variasi kombinasi batang kendali pengatur dan batang kendali kompensasi hasil simulasi	87
Tabel 4.18	Nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar reaktor Kartini hasil simulasi	87
Tabel 4.19	Hasil uji statistik nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar reaktor Kartini.....	88

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Skema reaksi fisi	19
Gambar 2.2	Skema reaksi fisi berantai	20
Gambar 2.3	Rancangan bangunan reaktor Kartini.....	30
Gambar 2.4	Proses perakitan teras reaktor Kartini	30
Gambar 2.5	Komponen reaktor Kartini arah vertikal	32
Gambar 2.6	Komponen reaktor Kartini arah horizontal	32
Gambar 2.7	Konfigurasi teras reaktor Kartini	33
Gambar 2.8	Ruang kendali reaktor Kartini.....	34
Gambar 2.9	Contoh tampilan sistem instrumentasi dan kendali reaktor Kartini	35
Gambar 2.10	Visualisasi reaktor TRIGA Mark II arah horizontal	36
Gambar 2.11	Visualisasi reaktor TRIGA Mark II arah vertikal	36
Gambar 2.12	Sistem pendingin sekunder reaktor Kartini.....	38
Gambar 2.13	Sistem pendingin primer reaktor Kartini	38
Gambar 2.14	Sungkup reaktor Kartini.....	39
Gambar 2.15	Visualisasi reflektor reaktor Kartini.....	41
Gambar 2.16	Elemen bahan bakar reaktor Kartini	43
Gambar 2.17	Grafik kekritisasi reaktor berdasarkan faktor multiplikasi	45
Gambar 2.18	Daya reaktor sebagai fungsi waktu setelah penyisipan reaktivitas untuk tiga sifat koefisien reaktivitas suhu.....	49
Gambar 2.19	Komponen sistem pengendalian reaktor.....	51
Gambar 2.20	Skema kalang pengendalian reaktor nuklir.....	52
Gambar 2.21	Perkembangan MCNP	59
Gambar 2.22	Simulasi partikel dalam MCNP	59
Gambar 2.23	Proses pengolahan data dengan SPSS.....	62
Gambar 3.1	<i>Flowchart</i> prosedur penelitian	64
Gambar 3.2	<i>Flowchart</i> eksperimen	65
Gambar 3.3	Ruang kendali reaktor Kartini.....	66

Gambar 3.4	Contoh tampilan pada SIK reaktor Kartini	67
Gambar 3.5	Contoh Grafik Reaktivitas Batang Kendali Pengatur	69
Gambar 3.6	Contoh Grafik Reaktivitas Batang Kendali Kompensasi.....	69
Gambar 3.7	Tampilan awal TRIGA-MCNP	72
Gambar 3.8	<i>Flowchart</i> tahapan pembuatan <i>input file</i>	72
Gambar 3.9	<i>Flowchart</i> tahapan simulasi dengan MCNP-6	73
Gambar 3.10	Tampilan <i>software</i> CHANGE2.exe	74
Gambar 3.11	Tampilan <i>software</i> Visual Editor	74
Gambar 4.1	Grafik hubungan reaktivitas ($\Sigma\rho$, cent) terhadap posisi (%) batang kendali pengatur hasil eksperimen	78
Gambar 4.2	Grafik hubungan reaktivitas ($\Sigma\rho$, cent) terhadap posisi (%) batang kendali kompensasi hasil eksperimen	79
Gambar 4.3	Grafik hubungan reaktivitas ($\Sigma\rho$, cent) terhadap posisi (%) batang kendali pengatur hasil simulasi	83
Gambar 4.4	Grafik hubungan reaktivitas ($\Sigma\rho$, cent) terhadap posisi (%) batang kendali kompensasi hasil simulasi	84

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Perhitungan	105
Lampiran 2	Kalibrasi batang kendali pengaman	115
Lampiran 3	Grafik hubungan posisi batang kendali terhadap waktu hasil eksperimen	116
Lampiran 4	Visualisasi reaktor Kartini	117
Lampiran 5	Hasil uji statistik <i>Mann-Whitney</i> dengan IBM SPSS.....	118
Lampiran 6	Cuplikan kode input simulasi.....	120



DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

<u>Satuan</u>	<u>Makna</u>
1 cent	1×10^{-2} \$
1 \$	100 cent
1 \$	7×10^{-2} Δk
1 cent	7×10^{-5} Δk
<u>Lambang</u>	<u>Keterangan</u>
A	Nomor Massa
α	Koefisien reaktivitas
α_T	Koefisien reaktivitas suhu
dk	Perubahan faktor multiplikasi
$d\rho/\Delta\rho$	Perubahan reaktivitas
$dT/\Delta T$	Perubahan suhu
ε	Faktor fisi cepat
f	Faktor pemanfaatan termal
k	Faktor multiplikasi
k_{eff}	Faktor multiplikasi efektif
k_{eff}	Faktor multiplikasi tak hingga
n	Neutron
η	Faktor reproduksi
p	Probabilitas tangkapan resonansi
ρ	Reaktivitas
P_{TNL}	Probabilitas neutron termal tidak bocor
P_{FNL}	Probabilitas neutron cepat tidak bocor
T	Suhu
X	Lambang unsur
Y	Lambang unsur
Z	Nomor atom
<u>Singkatan</u>	<u>Arti</u>
^{92}Kr	Kripton-92
^{141}Ba	Barium-141
^{232}Th	Thorium-232
^{233}U	Uranium-233
^{235}U	Uranium-235
^{236}U	Uranium-236
^{238}U	Uranium-238
^{239}Pu	Plutonium-239

^{241}Pu	Plutonium-241
AGR	<i>Advanced Gas-cooled Reactor</i>
ATR	Air Tangki Reaktor
B ₄ C	Boron karbida
BAPETEN	Badan Pengawas Tenaga Nuklir
BATAN	Badan Tenaga Atom Nasional
Be	Berilium
BWR	<i>Boiling Water Reactor</i>
BRIN	Badan Riset dan Inovasi Nasional
CANDU	<i>Canada Deuterium Uranium</i>
D ₂ O	Deuterium oksida
DPM	<i>Decade Per Minute</i>
ENDF	<i>Evaluated Nuclear Data File</i>
GCFBR	<i>Gas Cooled Fast Breeder Reactor</i>
GCR	<i>Gas Cooled Reactor</i>
H ₂ O	Dihidrogen oksida
He	Helium
HTGR	<i>High Temperature Gas-cooled Reactor</i>
HTR	<i>High Temperature Reactor</i>
IAEA	<i>International Atomic Energy Agency</i>
IFE	<i>Instrumented Fuel Element</i>
KSE	Kawasan Sains dan Edukasi
LAK	Laporan Analisis Keselamatan
LANL	<i>Los Alamos National Laboratory</i>
LMFBR	<i>Liquid Metal Fast Breeder Reactor</i>
MCNP	<i>Monte Carlo N-Particle</i>
Na	Natrium
NAA	<i>Neutron Activation Analysis</i>
NPT	<i>Non-Proliferation Treaty</i>
NRC	<i>Nuclear Regulatory Commission</i>
NTC	<i>Nuclear Training Centre</i>
PHWR	<i>Pressurized Heavy-Water Reactor</i>
PLTN	Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir
PPBMI	Pusat Penelitian Bahan Murni dan Instrumentasi
PSTA	Pusat Sains dan Teknologi Akselerator
PWR	<i>Pressurized Water Reactor</i>
RKU	Ruang Kendali Utama
SCFBR	<i>Super Critical Fast Breeder Reactor</i>
SPSS	<i>Statistical Package for the Social Sciences</i> <i>Statistical Product and Service Solution</i>

SS-304

TRIGA

Atomic

U-ZrH

VVER

ZrH

Stainless Steel seri 304

Training, Research and Isotope production by General

Uranium zirkonium hidrida

Vodo-Vodyanoi Energetichesky Reactor

Zirkonium hidrida



STATE ISLAMIC UNIVERSITY
SUNAN KALIJAGA
YOGYAKARTA

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Teknologi nuklir saat ini mengalami perkembangan yang cukup pesat, utamanya dalam bidang energi. Berbagai negara di dunia mulai melakukan pengembangan serta riset dalam hal pendayagunaan energi nuklir. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan salah satu pemanfaatan energi nuklir yang dianggap sebagai alternatif penghasil energi (Gumilar, dkk., 2018). Salah satu alternatif dalam penyelesaian masalah berkurangnya sumber energi fosil dan dampaknya yang ditimbulkan pada lingkungan yaitu dengan memanfaatkan energi nuklir sebagai pengganti energi fosil. Hal tersebut dikarenakan energi nuklir merupakan salah satu energi bersih yang tidak menghasilkan emisi (Bawani, 2015). Selain sebagai pembangkit listrik, energi nuklir juga dimanfaatkan dalam berbagai bidang, seperti penelitian dan produksi radioisotop.

Energi nuklir tersebut dalam penggunaannya diproses dan diolah dalam sebuah instalasi tempat terjadinya reaksi pembelahan inti secara berkelanjutan dan terkendali yang disebut reaktor nuklir (Syarip, 2018). Reaksi pembelahan inti yang terjadi merupakan reaksi berantai yang melepaskan energi dalam bentuk radiasi (Pandi, dkk., 2019). Reaksi pembelahan inti secara berantai terjadi apabila sebuah neutron menumbuk suatu inti bahan yang mudah belah, maka akan terjadi suatu inti atom majemuk yang bersifat sangat tidak mantap yang dengan segera akan menjadi dua buah inti hasil belah. Reaksi pembelahan inti yang terjadi sangat

bergantung pada sifat-sifat nuklir dari inti atom yang ditumbuknya dan kecepatan atau tenaga neutron tersebut (Syarip, 2018).

Nuklir dijelaskan dalam Al-Qur'an sebagai sebuah energi yang memiliki kekuatan hebat. Sebagaimana difirmankan Allah SWT dalam Al-Qur'an :

وَمَا تَكُونُ فِي شَأْنٍ وَمَا تَتْلُوا مِنْهُ مِنْ قُرْآنٍ وَلَا تَعْمَلُونَ مِنْ عَمَلٍ إِلَّا كُنَّا عَلَيْكُمْ شُهُودًا إِذْ تُفِيضُونَ فِيهِ وَمَا يَعْزُبُ عَنْ رَبِّكَ مِنْ مِثْقَالِ ذَرَّةٍ فِي الْأَرْضِ وَلَا فِي السَّمَاءِ وَلَا أَصْغَرَ مِنْ ذَلِكَ وَلَا أَكْبَرَ إِلَّا فِي كِتَابٍ مُبِينٍ (يونس: ٦١)

Artinya : *“Kamu tidak berada dalam suatu keadaan dan tidak membaca surat ayat dari Al-Qur'an dan kamu tidak mengerjakan, melainkan Kami menjadi saksi atasmu di waktu kamu melakukannya. Tidak luput dari pengetahuan Tuhanmu biarpun sebesar zarrah (atom) di bumi ataupun di langit. Tidak ada yang lebih kecil dan tidak (pula) yang lebih besar dari itu, melainkan (semua tercatat) dalam kitab yang nyata (Lauh Mahfuzh)”* (Q.S. Yunus : 61)

Ayat tersebut menyiratkan bahwa massa raksasa dan reaksi nuklir di dalamnya, yang terus berlangsung selama berjuta-juta tahun, beroperasi dalam keharmonisan yang sempurna dengan bumi. Perilaku ini dijelaskan sebagai suatu hal yang terkendali, yaitu menunjukkan adanya keseimbangan dan keteraturan dalam aktivitas tersebut. Manusia memiliki kemampuan untuk mengendalikan sesederhana apapun sumber tenaga nuklir, namun keberhasilan dalam pengendalian tersebut relatif terhadap izin Allah SWT (Yahya, 2004).

Keterbatasan kemampuan manusia dalam mengendalikan sumber tenaga nuklir dapat berakibat terjadinya peristiwa yang tidak dikehendaki. Contohnya seperti pada reaktor *Chernobyl* yang terletak di Rusia, kecelakaan nuklir yang terjadi di tahun 1986 pada reaktor tersebut tidak mampu dicegah oleh ilmuwan maupun peralatan teknologi yang canggih sekalipun. Efek yang ditimbulkan oleh

kecelakaan nuklir tersebut dikatakan akan bertahan 30 – 40 tahun. Meskipun bagian reaktor yang terkontaminasi telah ditutup dengan beton yang tebal guna mencegah kerusakan lebih lanjut, namun kebocoran pada beton tersebut tidak dapat dicegah. Kebocoran nuklir sangat berbahaya bagi kehidupan manusia, dan sains tidak berdaya terhadap ancaman tersebut, dalam artian bahwa apabila Allah SWT telah menghendaki segala sesuatu hanya berkata “Jadilah”, maka terjadilah apa yang dikehendaki-Nya. Kekuatan Allah SWT sangat luas mencakup pada setiap partikel di alam semesta dan partikel-partikel subatomik di dalamnya yang dijelaskan dalam Al-Qur’an surat Yunus ayat 61 tersebut (Hidayah, 2014).

Reaktor nuklir terbagi menjadi dua jenis berdasarkan fungsinya, yaitu reaktor daya dan reaktor non-daya. Reaktor daya digunakan untuk menghasilkan daya listrik atau pembangkit listrik, sedangkan reaktor non-daya merupakan reaktor yang digunakan untuk penelitian, pengujian bahan aktivasi neutron, pelatihan, serta produksi radioisotop. Reaktor non-daya juga dapat disebut sebagai reaktor riset karena salah satu fungsinya yaitu untuk penelitian. Indonesia saat ini memiliki tiga buah reaktor yang tersebar di tiga daerah berbeda, antara lain reaktor Kartini di Yogyakarta, reaktor TRIGA 2000 di Bandung, dan reaktor GA Siwabessy di Serpong.

Reaktor Kartini merupakan salah satu contoh reaktor riset di Indonesia dengan jenis reaktor TRIGA Mark-II tipe kolam terbuka berpendingin dan bermoderator air dengan desain daya 250 kW dan dioperasikan dengan daya 100 kW. Reaktor menggunakan bahan bakar dari paduan uranium zirkonium hidrida dengan pengkayaan rendah (*low enriched uranium*) 20%. Bahan bakar uranium

zirconium hidrida (U-ZrH) terdapat pada sebuah elemen bakar yang menjadi tempat terjadinya reaksi pembelahan inti dalam reaktor (Rohman, 2009). Tipe bahan bakar yang digunakan dalam reaktor Kartini yaitu tipe 104 dan 204, yang terdapat pada teras reaktor dan *bulk shielding* (Rohman & Setiawan, 2011). Reaktor Kartini pada saat ini sedang dikembangkan pendaayagunaannya menjadi tempat pelatihan dasar reaktor nuklir atau bagian dari *Nuclear Training Centre* (NTC) (Wicaksono & Syarip, 2016).

Reaktor nuklir dalam pengoperasiannya dipengaruhi beberapa aspek, seperti aspek teknis, aspek operasional, dan aspek keselamatan. Aspek keselamatan merupakan aspek terpenting pada reaktor, sehingga salah satu yang dipersyaratkan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) dalam pengajuan izin operasi reaktor adalah Laporan Analisis Keselamatan (LAK). Keselamatan pada reaktor ditunjang dengan adanya pengendalian reaktor yang bertujuan menjaga atau mengatur proses pembelahan inti dalam reaktor nuklir agar berada pada kondisi nilai yang diinginkan (*set point*). Pengendalian reaktor dilakukan karena adanya gangguan seperti perubahan pada reaktivitas, penambahan atau penyusutan bahan bakar, terjadinya perubahan temperatur, serta adanya racun produk fisi (Syarip, 2018).

Dalam pengoperasiannya, reaktor nuklir memiliki berbagai parameter yang mempengaruhi keselamatan pada operasi reaktor. Salah satu parameter penting tersebut yaitu reaktivitas, karena reaktivitas merupakan besaran yang mempengaruhi kendali, desain, serta operasi reaktor itu sendiri (Surbakti & Purwadi, 2017). Reaktivitas pada reaktor dapat disebut juga sebagai variabel

terkendali (*controlled variable*) dikarenakan nilainya yang dapat dikendalikan (Syarip, 2018).

Reaktivitas dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti suhu bahan bakar, suhu moderator, dan daya reaktor. Perubahan suhu berpengaruh terhadap besarnya nilai faktor multiplikasi (k), yang juga mempengaruhi nilai reaktivitas keseluruhan sistem. Reaktivitas menunjukkan perubahan faktor multiplikasi efektif dari kondisi kritis pada suatu reaktor (Rohman, 2009). Selama reaktor beroperasi, terdapat dua efek yang bekerja terhadap perubahan reaktivitas. Efek pertama yaitu efek akibat perubahan suhu moderator yang berkaitan dengan karakteristik moderator. Efek kedua yaitu efek akibat perubahan suhu bahan bakar yang berkaitan dengan perubahan daya reaktor, yang juga disebut dengan efek daya (Susanto, dkk., 2020).

Kedua efek yang dihasilkan tersebut mempengaruhi kekritisan reaktor. Kekritisan reaktor berkaitan erat dengan besarnya nilai faktor multiplikasi (k). Perubahan yang terjadi pada nilai k menyebabkan perubahan pada nilai reaktivitas keseluruhan sistem. Besarnya perubahan nilai koefisien reaktivitas yang disebabkan oleh suhu disebut koefisien reaktivitas suhu (α_T) (Rohman, 2009). Jika faktor multiplikasi bertambah besar dan suhu reaktor mengalami kenaikan, maka koefisien reaktivitas suhu positif.

Berdasarkan hal tersebut, maka dapat dikatakan kenaikan suhu mengakibatkan kenaikan reaktivitas. Fluks neutron dan laju reaksi fisi juga mengalami kenaikan seiring dengan kenaikan reaktivitasnya. sehingga dapat

disimpulkan bahwa suatu reaktor yang mempunyai koefisien reaktivitas suhu positif berpotensi tidak stabil.

Sebaliknya, jika kenaikan suhu reaktor mengakibatkan turunnya reaktivitas, dan penurunan suhu reaktor mengakibatkan naiknya reaktivitas, maka reaktor dapat dikatakan mempunyai koefisien reaktivitas suhu negatif. Reaktor yang mempunyai koefisien reaktivitas suhu negatif cenderung stabil, artinya reaktor cenderung kembali ke keadaan suhu semula.

Nilai koefisien reaktivitas negatif penting dalam hal keselamatan reaktor saat beroperasi, sehingga diperlukan pemantauan reaktivitas guna mencegah akibat-akibat yang ditimbulkan dari suatu penambahan atau perubahan reaktivitas yang tidak diharapkan (*unexpected*). Pemantauan reaktivitas dilakukan dengan mengisi LAK yang mencakup nilai-nilai parameter keselamatan pada reaktor.

Perhitungan nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar reaktor dapat dilakukan dengan berbagai jenis metode, seperti metode eksperimen dan metode simulasi. Pada penelitian Gumilar, dkk., (2018), dilakukan studi perhitungan koefisien reaktivitas temperatur pada *small pebble bed reactor*. Penelitian tersebut menggunakan metode simulasi dengan program transport Monte Carlo tipe MCNPX 2.6.0. Zuhair, dkk., (2016) dalam penelitiannya melakukan studi perhitungan reaktivitas batang kendali pada reaktor HTR-10 menggunakan model *benchmark* MCNP-6.

Penelitian mengenai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar telah dilakukan oleh Sadewo, dkk (2024). Penelitian tersebut bertujuan untuk membandingkan dan menganalisis koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar

reaktor Kartini pada studi literatur jurnal sumber terbuka dengan mengukur jumlah piksel dari grafik menggunakan *ImageJ* dan dihitung menggunakan *Excel*, hasil simulasi menggunakan TRIGA-MCNP dan MCNPX, serta hasil eksperimen. Hasil dari penelitian Sadewo, dkk (2024) pada studi literatur didapatkan nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar berkisar $9,2923 \times 10^{-5} \Delta k/^{\circ}\text{C}$ hingga $9,7419 \times 10^{-5} \Delta k/^{\circ}\text{C}$ untuk suhu 135°C dan 180°C , dengan simulasi didapatkan nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar $7,9620 \times 10^{-5} \Delta k/^{\circ}\text{C}$ untuk suhu antara $20,45^{\circ}\text{C}$ dan 226°C dan $1,1416 \times 10^{-4} \Delta k/^{\circ}\text{C}$ untuk suhu antara 126°C dan 226°C , hasil eksperimen didapatkan nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar rata-rata $5,4902 \times 10^{-5} \Delta k/^{\circ}\text{C}$.

Perhitungan koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar reaktor Kartini secara eksperimen telah dilakukan. Hasil perhitungan secara eksperimen perlu divalidasi dengan hasil simulasi. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dikaji tentang penentuan nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar pada reaktor Kartini dengan metode simulasi. Simulasi penentuan nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar menggunakan *software Monte Carlo N-Particle* (MCNP).

MCNP versi 6.2 digunakan dalam penelitian ini sebagai kebaruan dari penelitian sebelumnya untuk perhitungan nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar secara simulasi. Selain sebagai kebaruan, MCNP versi 6.2 juga memiliki beberapa keunggulan dibandingkan versi sebelumnya, dimana MCNP6.2 merupakan gabungan kode dari MCNP5 dan MCNPX yang disertai dengan penyempurnaan model fisika untuk emisi sekunder dan produksi

peluruhan, sumber peluruhan, dan sumber sinar kosmik. MCNP6.2 juga menyertakan pustaka yang direvisi untuk data penampang lintang, penyempurnaan kode lainnya untuk meningkatkan kemudahan penggunaan MCNP, dan menyediakan perhitungan yang lebih cepat dibandingkan dengan versi MCNP sebelumnya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dipaparkan diatas, maka rumusan masalah pada penelitian ini yaitu :

1. Berapakah nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar reaktor Kartini dengan metode eksperimen dan metode simulasi berbasis MCNP-6?
2. Apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar reaktor Kartini hasil eksperimen dengan nilai hasil simulasi berbasis MCNP-6?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini antara lain :

1. Menganalisis nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar reaktor Kartini dengan metode eksperimen dan metode simulasi berbasis MCNP-6.
2. Memvalidasi nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar reaktor Kartini hasil eksperimen dengan hasil simulasi berbasis MCNP-6.

1.4 Batasan Penelitian

Untuk menghindari meluasnya objek kajian pada penelitian ini, maka batasan yang diberikan pada penelitian ini antara lain :

1. Daya yang digunakan untuk mengoperasikan reaktor Kartini sebesar 100 kW.
2. Variasi dalam penelitian ini terdapat pada perubahan posisi batang kendali pengatur, kompensasi, dan kombinasi dari kedua batang kendali dengan batang kendali pengaman konstan pada posisi 100% pada setiap eksperimen.
3. Bahan bakar yang digunakan yaitu U-ZrH dengan kandungan uranium 8,5% berat dan pengkayaan 20%.
4. Parameter yang dihitung dalam penelitian ini adalah koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar dari reaktor Kartini.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah :

1. Memberikan informasi mengenai nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar reaktor Kartini yang diperoleh dengan metode eksperimen dan metode simulasi berbasis MCNP-6.
2. Memberikan informasi hasil validasi nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar reaktor Kartini hasil eksperimen dengan hasil simulasi berbasis MCNP-6.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar reaktor Kartini hasil eksperimen diperoleh sebesar 0,72 cent/°C, 0,78 cent/°C, 0,74 cent/°C, 0,77 cent/°C, dan 0,78 cent/°C untuk variasi posisi batang kendali pengatur, 0,94 cent/°C, 0,95 cent/°C, 0,71 cent/°C, 0,76 cent/°C, dan 0,59 cent/°C untuk variasi posisi batang kendali kompensasi, 0,91 cent/°C, 0,83 cent/°C, 0,69 cent/°C, 0,73 cent/°C, dan 1,60 cent/°C untuk variasi kombinasi kedua batang kendali tersebut. Sedangkan nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar hasil simulasi diperoleh sebesar 0,46 cent/°C, 0,39 cent/°C, 0,69 cent/°C, 0,77 cent/°C, dan 0,57 cent/°C untuk variasi posisi batang kendali pengatur, 1,77 cent/°C, 1,45 cent/°C, 1,33 cent/°C, 1,87 cent/°C, dan 1,55 cent/°C untuk variasi posisi batang kendali kompensasi, 1,16 cent/°C, 0,72 cent/°C, 0,83 cent/°C, 0,94 cent/°C, dan 2,32 cent/°C untuk variasi kombinasi kedua batang kendali tersebut.
2. Hasil uji statistik *Mann-Whitney* untuk kelima eksperimen, diperoleh nilai *Asymp.sig(2-tailed)* sebesar 0,513 untuk eksperimen pertama hingga ketiga, 0,127 untuk eksperimen keempat, dan 0,827 untuk eksperimen kelima. Nilai *Asymp.sig(2-tailed)* kelima eksperimen lebih besar dari 0,05, dimana H_0 diterima dan H_1 ditolak, sehingga dapat diartikan bahwa tidak ada perbedaan

yang signifikan pada nilai koefisien reaktivitas negatif suhu bahan bakar reaktor Kartini antara hasil eksperimen dan hasil simulasi.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat kekurangan pada hasil penelitian ini. Penulis berharap pada penelitian di masa mendatang dapat diperbaiki kekurangan yang ada dalam penelitian ini. Pada penelitian selanjutnya, pada proses kalibrasi batang kendali disarankan dapat ditentukan rentang pengambilan datanya, misalnya diberikan selisih rentang 10%, dengan pengambilan data posisi batang kendali dari posisi 0% sampai dengan 100%, sehingga nilai yang diperoleh untuk membuat grafik hubungan reaktivitas terhadap posisi batang kendali memiliki rentang posisi yang sama antara setiap eksperimen yang dilakukan.

DAFTAR PUSTAKA

- Basri, T. H. (2014). Sejarah dan Perkembangan Senjata Nuklir. *Jurnal Seuneubok Lada*, **2**(1), 96–105.
- Bawani, S. (2015). *Desain Reaktor Air Superkritis (Supercritical Cooled Water Reactor) dengan menggunakan Bahan Bakar Uranium-Thorium Model Teras Silinder*. (Tugas Akhir). Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Lampung. Bandar Lampung. <https://digilib.unila.ac.id/12943/117/COVERDALAM.pdf>
- Beisser, A., & Liong, T. H. (1987). *Konsep Fisika Modern* (ed. IV). Erlangga. Jakarta.
- BRIN Yogyakarta. (2021). *Sejarah Reaktor Kartini Yogyakarta*. Diakses 22 November 2023 dari <https://irlkartini.brin.go.id/index.php?m=sejarahkartini>
- Budiastuti, D., & Bandur, A. (2018). *Validitas dan Reliabilitas Penelitian : Dilengkapi Analisis dengan NVIVO, SPSS, dan AMOS* (Edisi Asli). Mitra Wacana Media. Jakarta.
- Faqqiyyah, H. (2017). *Analisis Dosis pada Uji Invitro dan Invivo Boron Neutron Capture Therapy*. (Tugas Akhir). Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Semarang. Semarang.
- Fauziah, F., & Karhab, R. S. (2019). Pelatihan Pengolahan Data Menggunakan Aplikasi SPSS Pada Mahasiswa. *Jurnal Pesut : Pengabdian Untuk Kesejahteraan Umat*, **1**(2), 129–136.
- Firdaus, A. J. A., Pramono, D., & Purnomo, W. (2020). Pengembangan Sistem Informasi UPT Kalibrasi Dinas Kesehatan Kabupaten Malang Berbasis Web. *Jurnal Sistem Informasi, Teknologi Informasi, dan Edukasi Sistem Informasi*, **1**(1), 23–34. <https://doi.org/10.25126/justsi.v1i1.3>
- Ginting, R. C. B. (2023). *Analisis Burn Up Modified Candle pada Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) dengan Bahan Bakar Uranium Oksida*. (Tugas Akhir). Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Gumilar, M. A. S., Zuhair, & Subkhi, M. N. (2018). Studi Perhitungan Koefisien Reaktivitas Temperatur Small Pebble Bed Reactor Berbahan Bakar Tipe Wallpaper Menggunakan Program Transport Monte Carlo MCNPX 2.6.0. *Al Jazari Journal of Mechanical Engineering*, **3**(1), 25–32.
- Handayani, M., Jayadilaga, Y., Fitri, A. U., Rachman, D. A., Istiqamah, N. F., T.A, T. D., Pratiwi, A. P., & Kas, S. R. (2023). Sosialisasi dan Pengenalan Aplikasi Pengolahan Data SPSS pada Mahasiswa Administrasi Kesehatan Fakultas Ilmu Keolahragaan dan Kesehatan. *JIPM : Jurnal Informasi*

Pengabdian Masyarakat, **1(2)**, 25–31. <https://e-journal.nalanda.ac.id/index.php/jipm>

Hidayah, N. (2014). *Perhitungan Bahan Bakar yang Tersisa Pada Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS) menggunakan MCNPX*. (Tugas Akhir). Jurusan Fisika, FST, UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta. Yogyakarta.

Isnaeni, A. (2017). Perhitungan reaktivitas lebih Reaktor Kartini menggunakan program komputer scale. *Seminar Keselamatan Nuklir*, 89–95.

Jeraj, R., Ravnik, M., Zagar, T., & Persic, A. (2016). *TRIGA Mark II Reactor Benchmark*. 23 September.

Junaidi. (2010). Statistika Non-Paramaterik. *Fakultas Ekonomi Universitas Jambi*, 1–4.

Khanifatun. (2007). *Pemantauan Radioaktivitas Udara di Ruang Reaktor Kartini*. (Tugas Akhir). Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Semarang. Semarang.

Komariyah, L. (2018). *Cara Cepat Pahami Konsep Fisika Inti* (ed. I). CV. Kaaffah Learning Center. Sulawesi Selatan.

Kurniawan, R. (2012). *Pemetaan Fluks Neutron pada Pusat Teras Pasca Pergantian Bahan Bakar Reaktor Kartini*. (Tugas Akhir). Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Yogyakarta. Yogyakarta.

Munggara, M. R. (2023). *Perhitungan Dosis Serap Sumber Paladium-103 dan Sesium-131 dalam Simulasi Brakiterapi Kanker Prostat dengan menggunakan Software Monte Carlo N-Particle 6 (MCNP-6)*. Jurusan Fisika, FST, UIN Sunan Kalijaga Yogyakarta. Yogyakarta.

Otaya, L. G. (2023). Pengaruh Penggunaan Aplikasi SPSS Terhadap Pemahaman Konsep Dan Keterampilan Mahasiswa Mengolah Data Statistik. *Tadbir: Jurnal Manajemen Pendidikan Islam*, **11(1)**, 87–101. <https://doi.org/10.30603/tjmpi.v11i1.3502>

Pandi, L. Y., Pramono, Y., & Aji, B. (2019). *Buku Saku Reaktor Nuklir : Pemanfaatan dan Pengawasan* (ed. 1). Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN). Jakarta.

PSTA BATAN Yogyakarta. (2021). *Reaktivitas Negatif Suhu Bahan Bakar*. (Modul). Bagian Reaktor, PSTA BATAN Yogyakarta. Yogyakarta.

Purwadi, P., & Pardi, P. (2020). Analisis Pengukuran Reaktivitas Batang Kendali Teras RSG-GAS dengan Metode Kompensasi. *SIGMA EPSILON - Buletin Ilmiah Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir*, **24(2)**, 67. <https://doi.org/10.17146/sigma.2020.24.2.5890>

- Qolby, B. S. (2014). *Uji Mann Whitney dalam Statistika Non Parametrik Perbedaan Tingkat Penggunaan Kendaraan Umum dengan Kendaraan Pribadi*.
- Ramadhani, R. A., Maharani, M. D., Dewita, N. A. P., Nanlohy, S. A. R., & Maesaroh, S. S. (2023). Pemanfaatan Aplikasi SPSS Dalam Analisis Pengaruh Biaya Pemasaran Dan Gaji Pada Pendapatan Perusahaan Telekomunikasi. *JIKA (Jurnal Informatika) Universitas Muhammadiyah Tangerang*, **7(3)**, 271. <https://doi.org/10.31000/jika.v7i3.8328>
- Rasito. (2013). *Pengenalan MCNP untuk Pengkajian Dosis*.
- Rasito, H.M., F., & Permana, S. (2019). *Penentuan Keff dan Waktu Siklus Operasi Reaktor TRIGA 2000 Untuk Variasi Bahan Bakar Tipe UZrH*. 184–191.
- Reafinola, S. H. (2021). *Perhitungan Laju Reaksi Neutron dalam Reaktor SCWR (Supercritical Water Reactor) Model Perangkat (Assembly) Heksagonal Berbahan Bakar Uranium*. (Tugas Akhir). Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Richardina, V., Setia Budi, W., & Tjiptono, T. W. (2015). *Studi Parameter Reaktor Berbahan Bakar UO₂ dengan Moderator H₂O dan Pendingin H₂O*. **18(3)**, 95–100.
- Rohanda, A., Waris, A., Suprianto, S., & Kurniadi, R. (2018). Studi Karakteristik Produk Hasil Fisi Reaktor Riset Berbasis Uranium Silisida pada Berbagai Level Daya. *Prosiding Seminar Nasional Infrastruktur Energi Nuklir 2018*, 287–296.
- Rohman, B. (2009). Koefisien Reaktivitas Temperatur Bahan Bakar Reaktor Kartini. *Indonesian Journal of Nuclear Science and Technology*, **10(2)**, 59–70.
- Rohman, B., & Setiawan, D. (2011). Kajian Pengaruh Penempatan Instrumented Fuel Element pada Pengukuran Suhu Elemen Bakar Reaktor Kartini. *Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir*, 39–49.
- Rokhmadi, T. S. (2007). Analisis Koefisien Reaktivitas Temperatur Moderator PWR dengan WIMS-ANL. *Prosiding PPI -PDIPTN 2007*, 186–194.
- Sadewo, P. H., Wicaksono, A. S., & Nugroho, T. S. H. (2024). Analysis of the Negative Temperature Coefficient of Reactivity of The Kartini Reactor. *AIP Conference Proceedings*, **2967(1)**. <https://doi.org/10.1063/5.0192866>
- Sanaky, M. M., Saleh, L. M., & Titaley, H. D. (2021). Analisis Faktor-Faktor Penyebab Keterlambatan Pada Proyek Pembangunan Gedung Asrama MAN 1 Tulehu Maluku Tengah. *Jurnal Simetrik*, **11(1)**, 432–439.

<https://doi.org/10.31959/js.v11i1.615>

- Santiani. (2011). *Nuklir, Fisika Inti dan Politik Energi Nuklir* (ed. 1). Intimedia (Kelompok In-TRANS Publishing). Malang.
- Sari, D. R. F. (2019). *Simulasi Dosis Radial Sumber Ir-192 untuk Brachytherapy Kanker Serviks Phantom Inhomogen menggunakan MCNPX*. (Tugas Akhir). Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Jenderal Soedirman. Banyumas.
- Sasmita, R. Q. J. (2017). *Analisis Nilai Koefisien Reaktivitas Suhu Bahan Bakar dan Moderator pada HTR-10*. (Tugas Akhir). Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Sebelas Maret. Surakarta.
- Setiyaningsih. (2019). *Desain Inti Reaktor SCWR (Supercritical Water Reactor) Model Teras Silinder (r, z) dengan Bahan Bakar Thorium Hasil Daur Ulang*. (Tugas Akhir). Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Setiyo, A., & Munir, M. (2010). Analisis Distribusi Suhu Aksial Teras Dan Penentuan k eff PLTN Pebble Bed Modular Reactor (PMBR) 10 MWE Menggunakan Metode MCNP 5. *Berkala Fisika*, **12**(3), 85–90.
- Simanjuntak, S. A. (2017). *Perhitungan Pembakaran Lengkap (Burn-Up) Reaktor Air Superkritis Bahan Bakar Thorium Model Perangkat (Assembly) Heksagonal menggunakan SRAC*. (Tugas Akhir). Jurusan Fisika, FMIPA, Universitas Lampung. Bandar Lampung.
- Sitopu, J. W., Purba, I. R., & Sipayung, T. (2021). Pelatihan Pengolahan Data Statistik Dengan Aplikasi SPSS. *Dedikasi Sains dan Teknologi*, **1**(2), 82–87. <https://doi.org/10.47709/dst.v1i2.1068>
- Sugiono, Noerdjanah, & Wahyu, A. (2020). Uji Validitas dan Reliabilitas Alat Ukur SG Posture Evaluation. *Jurnal Keterampilan Fisik*, **5**(1), 55–61. <https://doi.org/10.37341/jkf.v5i1.167>
- Surbakti, T., & Purwadi. (2017). Karakteristik Reaktivitas Teras Kerja RSG-GAS Selama 30 Tahun Beroperasi. *Jurnal Penelitian Fisika dan Aplikasinya (JPFA)*, **7**(1), 13. <https://doi.org/10.26740/jpfa.v7n1.p13-26>
- Susanto, Sukarno, S., & Suparjo. (2020). Pengukuran Koefisien Reaktivitas Daya Reaktor Rsg-Gas. *Reaktor : Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir*, **17**(2), 1. <https://doi.org/10.17146/bprn.2020.17.2.5979>
- Susdarwono, E. T. (2021). Reaksi Fisi dan Reaksi Fusi dalam Mekanisme Bom Atom dan Senjata Termonuklir. *VEKTOR: Jurnal Pendidikan IPA*, **2**(1), 16–30. <https://doi.org/10.35719/vektor.v2i1.19>
- Syarip. (2018). *Pengenalan Kinetika & Pengendalian Reaktor Nuklir*. Pustaka

Pelajar. Yogyakarta.

Trimawartinah. (2020). *Bahan Ajar Statistik Non Parametrik* (ed. 1). Universitas Muhammadiyah Prof. Dr. HAMKA. Jakarta Selatan. [http://repository.uhamka.ac.id/id/eprint/3880/1/Bahan Ajar Statistik Non Parametrik FINAL.pdf](http://repository.uhamka.ac.id/id/eprint/3880/1/Bahan_Ajar_Statistik_Non_Parametrik_FINAL.pdf)

Wicaksono, A. S., & Syarip. (2016). Validasi TRIGA-MCNP Perhitungan Massa Kritis Reaktor Kartini dengan Percobaan Kekritisasi. *Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir*, August.

Yahya, H. (2004). *Pustaka Sains Populer Islami : Kesempurnaan Penciptaan Atom* (ed. 1). Bandung Dzikra. Bandung.

Zuhair, & Suwoto. (2013). Analisis Perhitungan Koefisien Reaktivitas Temperatur Bahan Bakar dan Moderator Teras RGTT200K. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir PTNBR-BATAN Bandung*, 533–541.

Zuhair, Suwoto, Yazid, P. I., & Pane, J. S. (2016). *Studi Model Benchmark MCNP6 dalam Perhitungan Reaktivitas Batang Kendali HTR-10*. **10**, 95–103.

