

**STUDI PERHITUNGAN SEL BAHAN BAKAR NUKLIR BERBASIS  
URANIUM METAL (U-10%wtZr) DENGAN TAMBAHAN MINOR AKTINIDA  
MENGUNAKAN *SOFTWARE* SRAC**

**SKRIPSI**

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



**OLEH:**

**ADE RISTIKA**

**NIM. 08021281823097**

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

**2022**

**LEMBAR PENGESAHAN**  
**STUDI PERHITUNGAN SEL BAHAN BAKAR NUKLIR BERBASIS**  
**URANIUM METAL (U-10%wtZr) DENGAN TAMBAHAN MINOR**  
**AKTINIDA MENGGUNAKAN *SOFTWARE* SRAC**

**SKRIPSI**

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

Oleh:

**Ade Ristika**

**NIM. 08021281823097**

Inderalaya, April 2022

Menyetujui,

Pembimbing II



**Dr. Idha Rovani, S.Si., M.Si.**

**NIP. 197105151999032001**

Pembimbing I



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

**NIP. 197002231995121002**

**Mengetahui,**

**PLT. Ketua Jurusan Fisika**

**Wakil Dekan I Bidang Akademik**



**Dr. Hasanudin, M.Si.**

**NIP.197205151997021003**

## PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan dibawah ini, Mahasiswa Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya:

Nama : Ade Ristika

NIM : 08021281823097

Judul TA : Studi Perhitungan Sel Bahan Bakar Nuklir Berbasis Uranium Metal ( $U-10\%wtZr$ ) dengan Tambahan Minor Aktinida Menggunakan *Software* SRAC

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang saya susun dengan judul tersebut adalah asli atau orisinalitas dan mengikuti etika penulisan karya tulis ilmiah sampai pada waktu skripsi ini diselesaikan, sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana sains di program studi fisika universitas sriwijaya.

Demikian surat pernyataan ini dibuat dengan sebenar-benarnya tanpa ada paksaan dari pihak manapun. Apabila dikemudian hari terdapat kesalahan ataupun keterangan palsu dalam surat pernyataan ini, maka saya siap bertanggung jawab secara akademik dan bersedia menjalani proses hukum yang telah ditetapkan.

Indralaya, Mei 2022

Yang menyatakan,



Ade Ristika

NIM. 08021281823097

## KATA PERSEMBAHAN



*Dengan penuh rasa syukur, alhamdulillah telah diselesaikannya skripsi ini. Ku persembahkan skripsi ini terutama untuk diriku, selanjutnya saya persembahkan sepenuhnya untuk dua orang terhebat dalam hidup saya, yaitu Emak dan Bapak. Tak lupa juga untuk adik-adikku, keluarga besar serta teman-teman seperjuangan yang selalu memberikan semangat dan motivasi selama penulisan skripsi ini.*

*Jazaakumullahu Khairan*

*“...Boleh jadi kamu membenci sesuatu, padahal ia amat baik bagimu, dan boleh jadi (pula) kamu menyukai sesuatu, padahal ia amat buruk bagimu. Allah mengetahui, sedang kamu tidak mengetahui.”*

*(Q.S. Al-Baqarah: 216)*

## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah Subhanahu Wa Ta'ala karena berkat rahmat, hidayah dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi ini yang diberi judul **“Studi Perhitungan Sel Bahan Bakar Nuklir Berbasis Uranium Metal (U-10%wtZr) dengan Tambahan Minor Aktinida Menggunakan Software SRAC”** sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan pendidikan Sarjana Strata 1 di Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penelitian dan masih jauh dari kata sempurna, dikarenakan faktor kemampuan dan keterbatasan ilmu. Sehingga penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang membangun guna memperbaiki kesalahan penulisan dan kelengkapan penyusunan skripsi untuk ke depannya. Selain itu penulis juga berharap agar skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca sebagai tambahan referensi dan pengetahuan pada penelitian selanjutnya. Akhir kata penulis mengucapkan banyak terimakasih dan semoga skripsi ini dapat diterima dan bermanfaat bagi penulis khususnya dan pembaca umumnya, Aamiin.

Dalam penulisan skripsi ini bukan sebuah karya penulis sendiri, namun ada banyak pihak yang membantu penulis dalam proses pengerjaannya. Tanpa bantuan dan dukungan serta arahan dari pihak-pihak tersebut penelitian dan skripsi ini mungkin tidak dapat diselesaikan dengan baik. Oleh karena itu penulis mengucapkan banyak terimakasih kepada:

1. Allah Subhanahu Wa Ta'ala yang telah memberikan karunia, rahmat dan banyak nikmat kepada penulis.
2. Kedua orang tua penulis (Adi Hartono dan Eltisa) dan juga kedua adikku (Merlyanti Hasanah dan M. Fadil Pranata) yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan serta semangat untuk penulis selama menempuh pendidikan dan selama penelitian ini, mungkin tanpa mereka semua pasti Ade belum tentu sampai di tahap ini.
3. Bapak Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si. selaku pembimbing I dan Ibu Dr. Idha Royani, S.Si., M.Si. selaku pembimbing II. Terima kasih karena selalu sabar, ikhlas dan selalu memberikan dukungan serta semangat dalam membimbing penulis selama penelitian dan penulisan skripsi ini.

4. Ibu Dra. Jorena, M.Si., dan Ibu Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si., sebagai dosen penguji dalam sidang skripsi Ade. Terima kasih karena telah senantiasa meluangkan waktu untuk hadir dalam pemaparan sidang skripsi Ade dan juga sudah memberikan masukan yang sangat membangun agar penulisan skripsi Ade menjadi lebih baik lagi.
5. Bapak Drs. Hadir Kaban, M.T., selaku dosen pembimbing akademik di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam. Terima kasih atas bimbingan dan dukungannya selama Ade menempuh pendidikan di Universitas Sriwijaya.
6. Bapak Dr. Frinsyah Virgo, M.T., selaku ketua Jurusan Fisika dan Bapak Dr. Supardi S.Pd., M.Si., selaku Sekretaris Jurusan Fisika.
7. Bapak dan Ibu dosen serta staff administrasi Jurusan Fisika Universitas Sriwijaya, terima kasih karena telah membantu Ade dalam mengurus berkas untuk kebutuhan seminar dan sidang.
8. Untuk Ayuk Suci terima kasih telah sabar dan ikhlas serta meluangkan waktunya dalam mengajari dan membantu Ade dalam penelitian dan penyusunan skripsi ini.
9. Terima kasih untuk teman-teman seperjuangan ku “Ggsq (Nurlaila, Maysha, Mifta, Aulia dan Gina)”, “SRAC *squad* (Dini dan Via)” yang tak bosan selalu jadi tempat untuk bertanya-tanya serta sahabat terbaik ku “SAVIR (Vionita, Septi Ariani dan Riska Dewa Sefti)”. Terima kasih atas segala motivasi, semangat dan dukungan dari kalian semua.
10. Terima kasih untuk Wulan May Nita, Anas, Canti dan Aldi sebagai teman berdiskusi selama penelitian dan penulisan skripsi ini. Tak lupa saya ucapkan juga terima kasih untuk orang yang menyediakan “ruang antik” atas segala bantuan dan semangatnya dalam penulisan skripsi saya.
11. Terima kasih untuk sahabatku di kost (Veronicha Fs dan Dinda U) yang selalu mendengarkan keluh kesah ku dan sudah menjadi sumber bahagia sekaligus sumber pusingku waktu pulang dari kampus. Terima kasih sudah selalu saling mendukung dan memberi semangat serta menjadi pendengar setia dari cerita-cerita ku.
12. Teman-teman seperjuangan angkatan 2018, *Eliners*, kakak angkatan 2015, 2016 dan 2017, adek angkatan 2019 dan 2020 serta anggota Himafia terima kasih atas segala bantuannya dalam segala hal. Terima kasih untuk semua pihak yang tidak bisa

penulis sebutkan satu per satu yang sudah turut serta membantu penulis dalam penelitian dan penulisan skripsi ini baik yang membantu secara langsung maupun tidak langsung.

Semoga komunikasi dan tali silaturahmi kita tidak akan pernah putus meskipun kita sudah menjalani kehidupan masing-masing dan semoga semua kebaikan yang telah diberikan kepada penulis dalam penelitian dan penyelesaian skripsi ini dibalas lebih oleh Allah Subhanahu Wa Ta'ala. Aamiin.

Inderalaya, Mei 2022

Penulis

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Ade Ristika', with a long horizontal stroke extending to the right.

Ade Ristika

NIM. 08021281823097

**STUDI PERHITUNGAN SEL BAHAN BAKAR NUKLIR BERBASIS URANIUM  
METAL (U-10%wtZr) DENGAN TAMBAHAN MINOR AKTINIDA  
MENGUNAKAN SOFTWARE SRAC**

**Oleh:**

**Ade Ristika**

**NIM. 08021281823097**

**ABSTRAK**

Penelitian ini mendesain sel bahan bakar berbasis Uranium Metal Alam (U-10% wtZr) dengan tambahan *minor actinide* diantaranya Am-241, Np-237 dan Cm-244. Adapun pendingin yang digunakan berupa Helium dan kelongsongan berupa *Stainless Steel* (SS316). Sel bahan bakar ini berbentuk pin dengan diameter 1,4 cm. Sel bahan bakar diuji dengan pengayaan 5% tanpa *minor actinide* kemudian ditambahkan *minor actinide* secara bergantian. Perhitungan sel bahan bakar berdasarkan persamaan transport neutron menggunakan SRAC. Hasil perhitungan yang diperoleh menunjukkan Nilai faktor multiplikasi tak hingga ( $K_{Inf}$ ) dengan penambahan 5% amerisium-241 dan neptunium-237 dengan pengayaan 5% belum mencapai keadaan kritis dan mengalami penurunan nilai  $K_{Inf}$  di awal waktu *burn-up*. Penambahan curium-244 dengan pengayaan 5% semakin banyak persen curium-244 yang ditambahkan, nilai  $K_{Inf}$  semakin meningkat dan mencapai keadaan kritis saat penambahan 4% curium-244 dengan nilai  $K_{Inf}$  1,001198.

Kata kunci: *minor actinide*, *stainless steel*, pin, U-10%wtZr,  $K_{Inf}$ , SRAC.



Inderalaya, 27 Mei 2022

Menyetujui:

Pembimbing I



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

NIP. 197002231995121002

Pembimbing II





Dr. Idha Royani, S.Si., M.Si.

NIP. 197105151999032001

Mengetahui,

PLT. Ketua Jurusan Fisika

Wakil Dekan I Bidang Akademik

Dr. Hasanudin, M.Si.

NIP.197205151997021003

**STUDY OF NUCLEAR FUEL CELL CALCULATION BASED ON URANIUM METAL (U-10%WtZr) ADDITIONAL WITH MINOR ACTINIDE USING SRAC SOFTWARE**

**By:**

**Ade Ristika**

**NIM. 08021281823097**

**ABSTRACT**

*The research designs a fuel cell based on Natural Uranium Metal (U-10%wtZr) with the addition of minor actinide such as Am-241, Np-237 and Cm-244. The coolant used is Helium and the cladding is Stainless Steel (SS316). This fuel cell is pin shaped with a diameter of 1,4 cm. The fuel cell was tested with 5% enrichment without minor actinide and then minor actinide was added alternately. Calculation of fuel cells based on the neutron transport equation using SRAC. The calculation results obtained show that the value of the infinite multiplication factor ( $K_{Inf}$ ) with the addition of 5% americium-241 and neptunium-237 with 5% enrichment has not reached a critical state and has decreased in the  $K_{Inf}$  value at the beginning of the burn-up time. The addition of curium-244 with 5% enrichment, the more percent of curium-244 was added, the  $K_{Inf}$  value increased and reached a critical state when 4% curium-244 was added with a  $K_{Inf}$  value of 1,001198.*

*Keyword: minor actinide, stainless steel, pin, U-10%wtZr,  $K_{Inf}$ , SRAC.*

Inderalaya, 27 Mei 2022

Menyetujui:

Pembimbing I



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

NIP. 197002231995121002

Pembimbing II



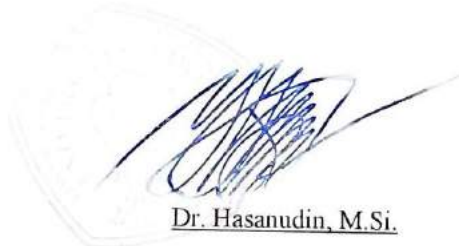
Dr. Idha Royani, S.Si., M.Si.

NIP. 197105151999032001

Mengetahui,

PLT. Ketua Jurusan Fisika

Wakil Dekan I Bidang Akademik



Dr. Hasanudin, M.Si.

NIP.197205151997021003

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) .....	4
Gambar 2.2 Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir.....	5
Gambar 2.3 Rantai Konversi Uranium.....	7
Gambar 2.4 Skema Transmutasi Inti MA di Dalam Reaktor Nuklir .....	10
Gambar 2.5 Pendinginan Teras Reaktor .....	11
Gambar 2.6 Reaksi Inti .....	122
Gambar 2.7 Reaktor Cepat Berpendingin Gas.....	133
Gambar 2.8 Pengaruh Waktu terhadap Populasi Neutron .....	144
Gambar 2.9 Prinsip Keseimbangan Nuklida.....	177
Gambar 2.10 Struktur Sistem SRAC .....	188
Gambar 3.1 Diameter geometri sel bahan bakar.....	20
Gambar 3.2 Diagram alir penelitian.....	21
Gambar 4.1. Desain sel bahan bakar berbentuk pin.....	23
Gambar 4.2. Faktor multiplikasi tak hingga ( $k_{Inf}$ ) dengan penambahan amerisium-241 selama waktu <i>burn-up</i> 150 tahun .....	24
Gambar 4.3. Faktor multiplikasi tak hingga ( $K_{Inf}$ ) dengan penambahan neptunium-237 selama waktu <i>burn-up</i> 150 tahun .....	26
Gambar 4.4. Faktor multiplikasi tak hingga ( $K_{Inf}$ ) dengan penambahan curium-244 selama waktu <i>burn-up</i> 150 tahun .....	27
Gambar 4.5. Level <i>burn-up</i> dengan penambahan amerisium-241 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	29
Gambar 4.6. Level <i>burn-up</i> dengan penambahan neptunium-237 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	28
Gambar 4.7. Level <i>burn-up</i> dengan penambahan curium-244 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	28

Gambar 4.8. <i>Conversion ratio</i> penambahan amerisium-241 selama waktu <i>burn-up</i> 150 tahun.....	31
Gambar 4.9. <i>Conversion ratio</i> penambahan neptunium-237 selama waktu <i>burn-up</i> 150 tahun.....	32
Gambar 4.10. <i>Conversion ratio</i> penambahan curium-244 selama waktu <i>burn-up</i> 150 tahun.....	33
Gambar 4.10. Densitas atom U-235 setelah penambahan amerisium-241 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	34
Gambar 4.12. Densitas atom U-238 setelah penambahan amerisium-241 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	35
Gambar 4.13. Densitas atom Pu-239 setelah penambahan amerisium-241 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	36
Gambar 4.14 Densitas atom Am-241 setelah penambahan amerisium-241 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	36
Gambar 4.15. Densitas atom U-235 setelah penambahan neptunium-237 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	37
Gambar 4.16. Densitas atom U-238 setelah penambahan neptunium-237 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	37
Gambar 4.17. Densitas atom Pu-239 setelah penambahan neptunium-237 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	38
Gambar 4.18. Densitas atom Np-237 setelah penambahan neptunium-237 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	38
Gambar 4.19. Densitas atom U-235 setelah penambahan curium-244 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	39
Gambar 4.20. Densitas atom U-238 setelah penambahan curium-244 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	40
Gambar 4.21. Densitas atom Pu-239 setelah penambahan curium-244 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	40

Gambar 4.22. Densitas aton Cm-244 setelah penambahan curium-244 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	41
Gambar 4.23. Fluks neutron setelah penambahan amerisium-241 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	42
Gambar 4.24. Fluks neutron setelah penambahan neptunium-237 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	43
Gambar 4.25. Fluks neutron setelah penambahan curium-244 selama 150 tahun waktu <i>burn-up</i> .....	43

## DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Jadwal Pelaksanaan Penelitian Tugas Akhir.....	19
Tabel 3.2 Parameter dan Spesifikasi Bahan Bakar .....	20
Tabel 4.1. Nilai <i>conversion ratio</i> penambahan amerisium-241 selama waktu <i>burn-up</i> 150 tahun dengan tingkat pengayaan U-235 sebanyak 5%.....	29

## DAFTAR ISTILAH

<i>Burn-up</i>	: banyaknya energi yang dihasilkan persatuan berat bahan bakar dalam reaktor.
<i>Cladding</i>	: kelongsongan yang memiliki fungsi sebagai pelindung dan pemisah antara bahan bakar dan pendingin.
<i>Coolant</i>	: berupa pendingin dalam suatu reaktor
<i>Conversion ratio</i>	: perbandingan antara jumlah atom fisil bahan bakar yang diproduksi dengan jumlah atom fisil bahan bakar yang dikonsumsi dalam reaktor.
Densitas atom	: populasi atom dalam setiap satuan volume.
Fisi	: reaksi pembelahan antara partikel neutron dengan inti atom yang disertai dengan pelepasan neutron dan energi.
Fluks neutron	: banyaknya neutron yang bergerak tiap satuan volume tertentu pada tiap satuan luas per detik.
Fusi	: reaksi penggabungan antara dua inti atom yang ringan menjadi inti atom yang lebih berat disertai dengan pelepasan energi.
$K_{inf}$	: suatu konstanta yang menunjukkan hitungan banyaknya jumlah neutron tanpa mengalami kebocoran ke luar teras reaktor.
Level <i>burn-up</i>	: keseluruhan dari energi yang dilepaskan per satuan massa bahan bakar sebagai hasil dari pembakaran bahan bakar.
<i>Minor actinide</i>	: bahan bakar nuklir bekas yang mempunyai waktu paruh relatif lama dengan toksisitas yang tinggi.



## DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN .....	Error! Bookmark not defined.
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	i
KATA PERSEMBAHAN .....	ii
KATA PENGANTAR.....	ivv
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR ISTILAH .....	xiii
DAFTAR ISI.....	xiv
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah .....	2
1.3. Batasan Masalah .....	3
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>4</b>
2.1 PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir).....	4
2.2 Reaktor Nuklir .....	5
2.2.1 Bahan Bakar ( <i>Fuel</i> ).....	6
2.2.2 <i>Minor Actinide</i> (MA).....	7
2.2.3 <i>Cladding</i> dan <i>Coolant</i> .....	9
2.3 Jenis Reaktor Nuklir .....	10
2.4 Reaksi Inti.....	11
2.5 GFR ( <i>Gas Cooled Fast Reactor</i> ).....	12
2.6 Faktor Multiplikasi dan Kekritisasi Nuklir .....	13

2.7	Analisis Neutronik.....	15
2.8	Transport Neutron .....	15
2.9	Persamaan <i>Burn-Up</i> .....	16
2.10	SRAC ( <i>Standard Reactor Analysis Code</i> ).....	17
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>		<b>19</b>
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian .....	19
3.2	Alat dan Bahan .....	19
3.3	Tahapan Penelitian .....	19
3.4	Spesifikasi Desain Sel Bahan Reaktor.....	20
3.5	Parameter Survei.....	21
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>23</b>
4.1	Desain Sel Bahan Bakar Nuklir.....	23
4.2	Analisis Perhitungan pada Sel Bahan Bakar .....	23
4.2.1	Faktor Multiplikasi Tak Hingga ( $K_{inf}$ ) dengan Penambahan <i>Minor Actinide</i> Selama Waktu <i>Burn-up</i> 150 Tahun .....	24
4.2.2	Level <i>Burn-up</i> dengan Penambahan <i>Minor Actinide</i> Selama Waktu <i>Burn-up</i> 150 Tahun .....	28
4.2.3	<i>Conversion Ratio</i> dengan Penambahan <i>Minor Actinide</i> Selama Waktu <i>Burn-up</i> 150 Tahun.....	29
4.2.4	Densitas Atom U-235, U-238, Pu-239, Am-241, Cm-244 dan Np-237 Selama Waktu <i>Burn-up</i> 150 Tahun.....	34
4.2.5	Fluks Neutron dengan Penambahan <i>Minor Actinide</i> Selama Waktu <i>Burn-up</i> 150 Tahun .....	42
<b>BAB V PENUTUP.....</b>		<b>45</b>
5.1	Kesimpulan.....	45
5.2	Saran .....	45
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>46</b>

<b>LAMPIRAN.....</b>	<b>50</b>
----------------------	-----------

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Seiring bertambahnya jumlah penduduk dan semakin meningkatnya kehidupan masyarakat, sehingga kebutuhan akan energi listrik juga meningkat. Hal ini selaras dengan meningkatnya laju pertumbuhan ekonomi dan perkembangan sektor industri serta sektor energi. Sektor energi dunia saat ini sebagian besar digerakkan oleh pembangkit listrik berbahan bakar fosil (Ramdhani et al., 2017). Pada tahun 2018 penggunaan bahan bakar fosil telah mencapai 85,7% dari total konsumsi energi dunia (Al-Zareer et al., 2020). Saat ini Indonesia adalah salah satu negara yang masih mengandalkan energi fosil untuk memenuhi kebutuhan listriknya. Hanya saja, energi fosil ini mempunyai masalah dengan keterbatasan sumber daya dan juga penurunan cadangan minyak, yang di manfaatkan secara berlebihan untuk keperluan manusia. Salah satu energi lain yang diharapkan bisa menggantikan energi fosil adalah energi nuklir dengan teknologi reaktor nuklir yang inovatif (Ramdhani et al., 2017).

Energi nuklir adalah salah satu dari beberapa solusi untuk menghasilkan tenaga yang saat ini sedang dikembangkan. Selain dapat menghasilkan energi yang besar, energi nuklir juga memiliki keunggulan lain, diantaranya lebih hemat dan tidak menimbulkan polusi. Energi nuklir itu sendiri diperoleh dari suatu pembelahan inti yang berat menjadi inti lebih ringan serta diikuti dengan pelepasan energi yang bisa terjadi secara terus menerus atau berantai. Salah satu keunggulan utama, dari energi nuklir dibandingkan konvensional bahan bakar fosil dalam hal dampak lingkungan adalah emisi operasional karbon nol atau mendekati nol (seperti banyak sumber energi terbarukan) (Al-Zareer et al., 2020). Pada energi nuklir hasil dari pembelahan inti harus dikendalikan di dalam suatu wadah yang biasa disebut dengan reaktor nuklir (Riska et al., 2016).

Sekarang, perkembangan reaktor nuklir sudah sampai ke tahap reaktor nuklir generasi IV. Dibandingkan dengan reaktor generasi sebelumnya, reaktor generasi IV yang masih dalam pengembangan ini, merupakan suatu jenis reaktor yang mempunyai daya yang lebih inovatif (Nurkholilah & Fitriyani, 2019). Adapun kelebihan dari reaktor generasi IV dibanding reaktor generasi I diantaranya lebih tinggi tingkat efisiensi bahan bakarnya, rendahnya limbah nuklir yang dihasilkan, lebih hemat, memiliki keandalan

dalam operasinya, serta tingginya tingkat keamanan. Salah satu jenis reaktor generasi IV adalah reaktor cepat *Gas Cooled Fast Reactor* atau biasa disingkat dengan GFR (Sardi et al., 2018). *Gas Cooled Fast Reactor* (GFR) merupakan reaktor generasi IV dengan pendingin gas helium. GFR menggunakan neutron spektrum cepat, selain itu juga memiliki suhu tinggi dengan menggunakan siklus bahan bakar tertutup. GFR menggabungkan keunggulan sistem spektrum cepat, untuk berkelanjutan jangka panjang sumber daya uranium dan minimalisasi limbah melalui beberapa pemrosesan ulang bahan bakar dan fisi aktinida berumur panjang (Syarifah, et al., 2020). Dengan alasan tersebut peneliti melakukan perhitungan sel bahan bakar untuk jenis reaktor GFR ini.

Penelitian yang telah dilakukan adalah perhitungan sel bahan bakar nuklir berbasis uranium metal yaitu uranium alam (uranium-238 dan uranium-235), bahan bakar ini digunakan karena di alam ketersediaannya relatif banyak (Putri et al., 2021). Selanjutnya bahan bakar uranium akan dikombinasikan dengan 10% zirkonium (U-10%wtZr) dan ditambahkan juga minor aktinida. Tujuan dari penambahan zirkonium ini dapat berguna untuk mempercepat reaksi berantai atau reaksi fisinya (Walter & Reynolds, 1981). Sedangkan penambahan minor aktinida bertujuan agar reaktor tahan terhadap penyebaran bahan bakar nuklir yang berbahaya (Suwoto & Zuhair, 2012). Melekatnya keselamatan pasif antara bahan bakar dan pendingin memiliki kompatibilitas yang baik, tingginya konduktivitas termal, baiknya ekonomi pada neutron, serta sederhananya sistem fabrikasi yang ada, merupakan beberapa kelebihan atau keunggulan dari bahan zirkonium (Masrukan et al., 2017). Sel bahan bakar diuji dengan penambahan minor aktinida dengan pengayaan 1-5%, kemudian melakukan perhitungan sel bahan bakar supaya tetap berkeadaan kritis dengan waktu *burn-up* sampai 150 tahun.

## **1.2. Rumusan Masalah**

Rumusan masalah dari penelitian ini diantaranya:

1. Bagaimana desain sel bahan bakar berbasis Uranium Metal (U-10%wtZr) dengan menggunakan pendingin helium supaya tetap berkeadaan kritis atau faktor multiplikasi bernilai sama dengan satu selama waktu *burn-up* sampai 150 tahun?

2. Bagaimana perbandingan dari parameter survei diantaranya level *burn-up*, faktor multiplikasi tak hingga, konversi rasio, densitas atom dan fluks neutron dalam waktu *burn-up* 150 tahun?

### **1.3. Batasan Masalah**

Batasan masalah dari penelitian ini yaitu sel bahan bakar yang digunakan adalah Uranium Metal (U-10%wtZr) dengan pendingin Helium dimana tingkat pengayaan sel bahan bakar antara 1 sampai 5% dan analisis dari sel bahan bakar menggunakan perangkat lunak SRAC (*Standard Reactor Analysis Code*).

### **1.4. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan dari penelitian ini diantaranya:

1. Menganalisa pengaruh penambahan minor aktinida Cm, Am dan Np dalam sel bahan bakar U-10%wtZr terhadap level *burn-up*, densitas atom, faktor multiplikasi tak hingga, konversi rasio dan fluks neutron.
2. Melakukan perbandingan parameter survei (level *burn-up*, densitas atom, faktor multiplikasi tak hingga, konversi rasio dan fluks neutron) dalam rentang waktu *burn-up* sampai 150 tahun.

### **1.5. Manfaat Penelitian**

Hasil dari penelitian ini bermanfaat untuk memberikan informasi mengenai perhitungan sel bahan bakar nuklir berbasis uranium metal (U-10%wtZr) dengan tambahan minor aktinida menggunakan perangkat lunak SRAC dalam rentang waktu *burn-up* sampai 150 tahun dan dapat dijadikan sebagai referensi pada penelitian selanjutnya terutama dalam perhitungan sel bahan bakar agar memperoleh teras reaktor yang optimum.

## DAFTAR PUSTAKA

- Al-Zareer, M., Dincer, I., & Rosen, M. A. (2020). Analysis and Assessment of the Integrated Generation IV Gas-Cooled Fast Nuclear Reactor and Copper-Chlorine Cycle for Hydrogen and Electricity Production. *Energy Conversion and Management*, 205, 2–10.
- Alatas, Z., Hidayati, S., Akhadi, M., Purba, M., Purwadi, D., Ariyanto, S., Winarno, H., Resmiyanto, Sofyatiningrum, E., H, H., Widyastono, H., & Parmanto, E. (2016). *Buku Pintar Nuklir*. Jakarta: BATAN Press.
- BATAN (Badan Tenaga Nuklir Nasional). Reaktor dan Klasifikasinya. Diakses dari <http://www.batan.go.id/index.php/id/infonuklir/reaktor-infonuklir/81420> tanggal November 2021.
- Duderstadt, J., & Hamilton, J. (1976). *Nuclear Reactor Analysis*. New York: Department of Nuclear Engineering.
- Fareha, M. A., Syarifah, R. D., Su'Ud, Z., & Kurniasih, N. (2018). Design Study of 600 MWt Long Life Modular Gas Cooled Fast Reactors. *Journal of Physics: Conference Series*, 1090(1), 2–9.
- Kim, K. H., Kim, J. H., Oh, S. J., Lee, J. W., Lee, H. J., & Lee, C. B. (2016). Fabrication of U-10 wt.%Zr Metallic Fuel Rodlets for Irradiation Test in BOR-60 Fast Reactor. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2–7.
- Lestari, M. A., & Fitriyani, D. (2014). Pengaruh Bahan Bakar UN-PuN, UC-PuC dan MOX Terhadap Nilai Breeding Ratio pada Reaktor Pembiak Cepat. *Jurnal Fisika Unand*, 3(1), 14–19.
- Masrukan, M., Setiawan, J., & Biyantoro, D. (2017). Identifikasi Fasa Pelet Bahan Bakar U-ZrHx Hasil Proses Sinter Dengan Atmosfer Nitrogen. *Urania*, 23(3), 139–152.
- Monado, F., Ariani, M., Royani, I., & Su'ud, Z. (2020). Comparative Study of Conceptual Design of Gas-Cooled Fast Reactor Core Type Tall Versus Pan Cake Based on MCANDLE-B Burn Up Strategy. *Journal of Physics: Conference Series*, 1568, 1–5.

- Monado, F., Ariani, M., Su'Ud, Z., Waris, A., Basar, K., Aziz, F., Permana, S., & Sekimoto, H. (2014). Conceptual Design Study On Very Small Long-Life Gas Cooled Fast Reactor Using Metallic Natural Uranium-Zr as Fuel Cycle Input. *AIP Conference Proceedings*, 1584(February 2015), 105–108.
- Mulyaman, M. (2008). Kajian Fluks Neutron Teras Reaktor Daya Generasi Lanjut. *Sigma Epsilon*, 12(2), 35–39.
- NEA. (2014). *Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems*. NEA Publishing.
- Novalianda, S., Ramadhan, A., & Su'ud, Z. (2020). Perhitungan Burnup Desain Reaktor GFR Berbasis Bahan Bakar Uranium Nitride. *Jurnal Penelitian Sains*, 22(2), 50–54.
- Nurkholilah, & Fitriyani, D. (2019). Analisis Burn Up pada Reaktor Pembiak Cepat Berpendingin Pb-Bi dengan Variasi Fraksi Bahan Bakar dan Bahan Pendingin Nurkholilah \*, Dian Fitriyani. *Jurnal Fisika Unand*, 8(2), 184–190.
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., & Tsuchihashi, K. (2007). *SRAC2006: A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*. Japan: Japan Atomic Energy Agency (JAEA).
- Osuský, F., Čerba, Š., Lüley, J., Vrban, B., Haščík, J., & Nečas, V. (2020). On Gas-Cooled Fast Reactor Designs – Nuclear Data Processing with Sensitivity, Uncertainty and Similarity Analyses. *Progress in Nuclear Energy*, 128, 2–14.
- Putri, S. C., Ariani, M., Royani, I., Arsali, & Monado, F. (2021). The Calculation of Uranium Metallic Fuel ( U-10 % wtZr ) Cell with Helium Coolant Using SRAC 2K6. *Journal of Physics: Conference Series*, 2126, 1–7.
- Ramdhani, R. N., Prastyo, P. A., Waris, A., Widayani, & Kurniadi, R. (2017). Neutronics Analysis of SMART Small Modular Reactor using SRAC 2006 Code. *Journal of Physics: Conference Series*, 877(1), 1–6.
- Rezki, W. F., Fitriyani, Di., & Aziz, F. (2019). Analisis Pengaruh Temperatur Input Terhadap Kekritisian High Temperature Gas Reactor Berbahan Bakar TRISO Dengan Pelapis Zirkonium Karbida. *Jurnal Fisika Unand*, 8(3), 295–300.



- Riska, Fitriyani, D., & Irka, F. H. (2016). Analisis Neutronik pada Gas Cooled Fast Reactor ( GCFR ) dengan Variasi Bahan Pendingin ( He , CO 2 , N 2 ). *Jurnal Fisika Unand*, 5(1), 28–34.
- Sabrina, A. N., Sari, A. K., Janah, L. N., & Rizqi, M. (2020). Design Study of Gas Cooled Fast Reactor ( GFR ) with Uranium Plutonium Carbide ( UC-PuC ) as Fuel with Addition Protactinium ( Pa-231). *Computational and Experimental Research in Materials and Renewable Energy (CERiMRE)*, 3(1), 19–26.
- Sardi, W., Fitriyani, D., & Irka, F. H. (2018). Analisis Neutronik pada Gas Cooled Fast Reactor ( GCFR ) dengan Variasi Umur Teras dan Daya Reaktor. *Jurnal Fisika Unand*, 7(2), 151–158.
- Shafii, M. A., Septi, R., Handayani Irka, F., Arkundato, A., & Su'ud, Z. (2021). Neutronic Analysis of Sodium-Cooled Fast Reactor Design with Different Fuel Types Using Modified CANDLE Shuffling Strategy in a Radial Direction. *International Journal of Energy Research*, 45(8), 1–12.
- Shelley, A. (2020). Neutronic Analyses of Americium Burning U-free Inert Matrix Fuels. *Progress in Nuclear Energy*, 130,1-20.
- Suhaemi, T. (2016). Pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Menopang Kebutuhan Eenergi Listrik Nasional. *Seminar Nasional TEKNOKA\_FT UHAMKA*,1,162–170.  
<https://journal.uhamka.ac.id/index.php/teknoka/article/view/809>
- Susanty, E., Ariani, M., Su'Ud, Z., & Monado, F. (2019). Calculation of Burnup Fuel Cell Uranium Metallic with Carbon Dioxide Cooled. *Journal of Physics: Conference Series*, 1282(1), 1–5.
- Suwoto, & Zuhair. (2012). Studi dan Observasi Awal Kebutuhan Data Nuklir untuk Reaktor Generasi IV (Gen-IV). *Jurnal Ilmu Fisika Indonesia*, 1(1), 18–25.
- Syarifah, R. D., Arkundato, A., Irwanto, D., & Su'ud, Z. (2020). Neutronic Analysis of Comparation UN-PuN Fuel and ThN Fuel for 300MWth Gas Cooled Fast Reactor Long Life without Refueling. *Journal of Physics: Conference Series*, 1436, 1–7.
- Syarifah, R. D., Su'ud, Z., Basar, K., & Irwanto, D. (2017). Fuel Fraction Analysis of 500

- MWth Gas Cooled Fast Reactor with Nitride (UN-PuN) Fuel without Refueling. *Journal of Physics: Conference Series*, 799(1), 1–6.
- Syarifah, R. D., Su'ud, Z., Basar, K., & Irwanto, D. (2020). Actinide Minor Addition on Uranium Plutonium Nitride Fuel for Modular Gas Cooled Fast Reactor. *Journal of Physics: Conference Series*, 1493, 1–7.
- Syarifah, R. D., Yulianto, Y., Su'ud, Z., Basar, K., & Irwanto, D. (2017). Neutronic Analysis of Thorium Nitride (Th, U233)N Fuel for 500MWth Gas Cooled Fast Reactor (GFR) Long Life without Refueling. *Key Engineering Materials*, 733, 47–50.
- Syarip, Sutondo, T., & Triyono, E. BS. (2013). Rancangan Konseptual Reaktor Subkritik Untuk Kajian Transmutasi Limbah PLTN Berbasis Reaktor Kartini. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 15(2), 142.
- Walter, A. E., & Reynolds, A. B. (1981). *Fast Breeder Reactor*. New York: Pergamon Press.
- Widiawati, N., Suud, Z., Irwanto, D., & Sekimoto, H. (2018). Neutronic Comparison Study between Pb(208)-Bi and Pb(208) as a Coolant in the Fast Reactor with Modified CANDU Burn up Scheme. *Journal of Physics: Conference Series*, 1090(1).
- Wulandari, C., Waris, A., Permana, S., & Pramuditya, S. (2021). Neutronic Performances of 100 MWe MSR with Weapon Grade Plutonium Fuel. *Journal of Physics: Conference Series*, 1949(1), 1–6.