

TESIS
ANALISIS DESAIN TERAS REAKTOR CEPAT BERPENDINGIN GAS S-CO₂
BERBAHAN BAKAR *URANIUM METALLIC* DENGAN MINOR AKTINIDA

Diajukan Untuk Melengkapi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Magister Sains



Muhamad Tauffan Hidayatullah Norman

NIM : 08072622327002

PROGRAM STUDI MAGISTER FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2024

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS DESAIN TERAS REAKTOR CEPAT BERPENDINGIN GAS S-CO₂ BERBAHAN BAKAR URANIUM METALLIC DENGAN MINOR AKTINIDA

**Diajukan untuk Melengkapi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Magister Sains**

Oleh :

Muhamad Tauffan Hidayatullah Norman

08072622327002

Palembang, 23 Desember 2024

Pembimbing I



Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si.
NIP. 197002231995121002

Pembimbing II



Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si.
NIP. 197211252000122001

Mengetahui

Koordinator Program Studi

Magister Fisika FMIPA Unsri



Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si.
NIP. 197211252000122001

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa tesis ini dengan judul “Analisis Desain Teras Reaktor Cepat Berpendingin Gas S-CO₂ Berbahan Bakar *Uranium metallic* dengan Minor Aktinida” telah diseminarkan dihadapan tim penguji seminar sidang Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya pada tanggal 27 Desember 2024 dan dinyatakan sah.

Palembang, 27 Desember 2024

Pembimbing :

1. Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si.
NIP. 197002231995121002

()

2. Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si.
NIP. 197211252000122001

()

Ketua Penguji :

1. Dr. Erry Koriyanti, S.Si., M.T.
NIP. 16910261995122001

()

Anggota Penguji :

1. Dr. Idha Royani, S.Si., M.Si.
NIP. 197105151999032001

()

Mengetahui,
Dekan Fakultas Matematika
dan Ilmu Pengetahuan Alam

Koordinator Program Studi
Magister Fisika FMIPA Unsri





Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si.
NIP. 197211252000122001

HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhamad Tauffan Hidayatullah Norman

NIM : 08072622327002

Judul : Analisis Desain Teras Reaktor Cepat Berpendingin Gas S-CO₂ Berbahan Bakar *Uranium metallic* dengan Minor Aktinida

Menyatakan bahwa tesis ini merupakan hasil karya saya sendiri didampingi tim pembimbing dan bukan hasil penjiplakan atau plagiat. Apabila ditemukan unsur penjiplakan/plagiat dalam tesis ini, maka Saya bersedia menerima sanksi akademik dari Universitas Sriwijaya sesuai aturan yang berlaku.

Demikian, pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.

Palembang, Desember 2024

Hormat Saya,



M. Tauffan. H. N

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhamad Tauffan Hidayatullah Norman

NIM : 08072622327002

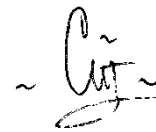
Judul : Analisis Desain Teras Reaktor Cepat Berpendingin Gas S-CO₂ Berbahan Bakar *Uranium metallic* dengan Minor Aktinida

Memberikan izin kepada pembimbing dan Universitas Sriwijaya untuk mempublikasikan hasil penelitian Saya untuk kepentingan akademik apabila dalam waktu 1 tahun tidak mempublikasikan penelitian Saya. Dalam kasus ini saya setuju untuk menempatkan pembimbing sebagai penulis korespondensi (corresponding author).

Demikian pernyataan ini saya buat dalam keadaan sadar dan tanpa ada paksaan dari siapapun.

Palembang, Desember 2024

Hormat Saya,



M. Tauffan. H. N

HALAMAN PERSEMBAHAN

يَا أَيُّهَا الَّذِينَ ءَامَنُوا إِذَا قِيلَ لَكُمْ تَفَسَّحُوا فِي الْمَجَالِسِ فَافْسَحُوا يَفْسَحِ اللَّهُ لَكُمْ وَإِذَا قِيلَ
أَنْشُرُوا فَأَنْشُرُوا يَرْفَعِ اللَّهُ الَّذِينَ ءَامَنُوا مِنْكُمْ وَالَّذِينَ أُوتُوا الْعِلْمَ دَرَجَاتٍ ۗ وَاللَّهُ بِمَا
تَعْمَلُونَ خَبِيرٌ

Artinya: "Hai orang-orang beriman apabila dikatakan kepadamu: "Berlapang-lapanglah dalam majelis", maka lapangkanlah niscaya Allah akan memberi kelapangan untukmu. Dan apabila dikatakan: "Berdirilah kamu", maka berdirilah, niscaya Allah akan meninggikan orang-orang yang beriman di antaramu dan orang-orang yang diberi ilmu pengetahuan beberapa derajat. Dan Allah Maha Mengetahui apa yang kamu kerjakan."

(QS. Surat Al-Mujadalah ayat: 11).

*Tesis ini saya persembahkan kepada
Program Studi Magister Fisika
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam
Universitas Sriwijaya*

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah ta'ala, sholawat serta dan salam kepada makhluk allah yang paling mulia, nabi Muhammad bin Abdullah, juga kepada keluarga, para sahabat, dan orang-orang yang mengambil jalan beliau dan meniti jejak beliau hingga hari kiamat.

Alhamdulillah penulis dapat menyelesaikan penelitian tesis yang berjudul **“Analisis Desain Teras Reaktor Cepat Berpendingin Gas S-CO₂ Berbahan Bakar *Uranium metallic* dengan Minor Aktinida”**. Tujuan dari penulisan tesis ini adalah untuk memenuhi syarat dalam mencapai derajat Magister Sains (M.Si) pada program pascasarjana Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.

Di dalam proses penulisan tesis ini, penulis banyak mendapatkan bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak sehingga penulisan tesis ini dapat terselesaikan. Ucapan terima kasih yang mendalam kepada dosen pembimbing Bapak Dr. Fiber Monado, M.Si dan Ibu Dr. Menik Ariani, M.Si. yang bersedia meluangkan waktu dan tenaga dalam memberi pembelajaran serta arahan kepada penulis. Tidak lupa juga saya ucapkan terima kasih kepada kedua orang tua saya yang sudah mensupport saya dan mendoakan saya di setiap sholatnya. Ucapan terima kasih juga saya berikan kepada teman sejawat saya yang sudah memberikan nasihat, saran, dan solusi disaat saya mengalami kesusahan. Selain itu, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada:

1. Rektor Universitas Sriwijaya, Bapak Prof. Dr. Taufiq Marwa, S.E., M.Si.
2. Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya, Bapak Prof. Hermansyah, S.Si., M.Si., Ph.D.
3. Ketua Program Studi Magister Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya, Dr. Menik Ariani, M.Si.
4. Semua dosen penguji sidang akhir yang telah memberikan arahan dan masukan guna perbaikan tesis.
5. Seluruh dosen pengajar Magister Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya yang telah memberikan ilmunya

6. Kepala sekolah SMP 3 Jebus, Bapak Syamsilahuddin Norman, S.Pd.

7. Guru-guru yang berada di SMP Negeri 3 Jebus

Penulis berharap tesis ini dapat memberikan manfaat kepada pembaca, khususnya mahasiswa untuk menambah wawasan dan pengetahuan. Penulis menerima kritik dan saran yang bersifat membangun guna memperbaiki kesalahan di masa depan.

Palembang, Desember 2024

Hormat Saya,



M. Tauffan. H. N

RINGKASAN

Analisis Desain Teras Reaktor Cepat Berpendingin Gas S-CO₂ Berbahan Bakar *Uranium metallic* dengan Minor Aktinida

Karya tulis berupa tesis, 20 Desember 2023

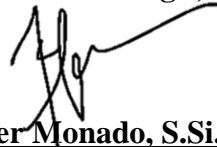
Muhamad Tauffan Hidayatullah Norman; Dibimbing oleh Dr. Fiber Monado, M.Si. dan Dr. Menik Ariani, M. Si. Magister Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya.

Telah dilakukan desain dan analisis neutronik teras reaktor cepat berpendingin gas (GFR) S-CO₂ berbahan bakar *uranium metallic* dengan penambahan minor aktinida menggunakan strategi *burn-up* MCANDLE (*Modified CANDLE*) dengan *shuffling* arah radial. SRAC sebagai program perhitungan neutronik untuk sel bahan bakar dan teras reaktor dengan modul PIJ dan CITATION yang terintegrasi di dalamnya. Parameter yang diamati pada perhitungan sel bahan bakar antara lain faktor multiplikasi infinite (K_{inf}), *level burn-up*, rasio konversi, dan densitas atom. Parameter yang diamati pada perhitungan teras yaitu faktor multiplikasi efektif (K_{eff}) dan distribusi daya. Hasil perhitungan sel bahan bakar menunjukkan tidak ada pengaruh yang signifikan penambahan minor aktinida pada bahan bakar terhadap *level burn-up*, rasio konversi dan K_{inf} , parameter tersebut menunjukkan kecenderungan yang mirip. Namun, penambahan minor aktinida berhasil membakar sebagian besar minor aktinida selama periode *burn-up*. Hasil perhitungan teras reaktor menunjukkan terjadi peningkatan reaktivitas reaktor setiap penambahan minor aktinida dan distribusi yang kurang merata. Nilai K_{eff} tertinggi terjadi pada penambahan minor aktinida Am-241 dan Np-237 sebanyak 5% yaitu masing-masing sebesar 1,05481 dan 1,05771 dengan persentase eksese reaktivitas sebesar 5,2% dan 5,46%. Berdasarkan hasil penelitian, disimpulkan bahwa penambahan minor aktinida tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap performa sel bahan bakar namun berhasil membakar sebagian besar limbah minor aktinida. Penambahan minor aktinida Am-241 dan Np-237 hingga 5% pada bahan bakar masih dapat membuat reaktor beroperasi dalam keadaan kritis.

Kata Kunci : GFR, MCANDLE, *Zirconium*, Am-241, Np-237, SRAC

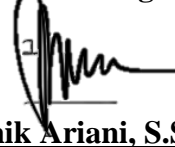
Palembang, Desember 2024

Pembimbing I,



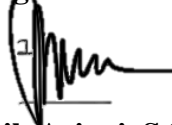
Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si.
NIP. 197002231995121002

Pembimbing II,



Dr. Menik Ariani, S.Si, M.Si.
NIP. 197211252000122001

Mengetahui,
Koordinator Program Studi Magister Fisika



Dr. Menik Ariani, S.Si, M.Si.
NIP. 197211252000122001

SUMMARY

Design Analysis of Gas-cooled Fast Reactor (GFR) Cooled S-CO₂ from Uranium Metallic with Minor Aktinida

Writing in the form of a thesis

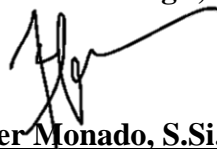
Muhamad Tauffan Hidayatullah Norman; Supervised by Dr. Fiber Monado, M.Si. and Dr. Menik Ariani, M.Si. Master of Physics, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Sriwijaya University

The design and neutronic analysis of the gas-cooled fast reactor (GFR) S-CO₂ fueled with metallic uranium with the addition of minor actinides has been carried out. Using MCANDLE (Modified CANDLE) burn-up strategy with radial shuffling. Calculations were carried out using the SRAC program with the PIJ module for fuel cell calculations and CITATION for reactor core calculations. The parameters observed in fuel cell calculations include infinite multiplication factor (K_{inf}), burn-up level, conversion ratio, and atomic density. The parameters observed in the core calculation are the effective multiplication factor (K_{eff}) and power distribution. The fuel cell calculation results show that there is no significant effect of the addition of minor actinides to the fuel on the burn-up level, conversion ratio and K_{inf}, these parameters show a similar trend. However, the addition of minor actinides successfully burned most of the minor actinides during the burn-up period. The results of reactor core calculations show that there is an increase in reactor reactivity with each minor addition of actinide and the distribution is less even. The highest K_{eff} value occurred when the minor actinides Am-241 and Np-237 were added at 5%, namely 1.05481 and 1.05771 respectively with excess reactivity percentages of 5.2% and 5.46%. Based on the research results, it was concluded that the addition of minor actinide did not have a significant effect on fuel cell performance and was successful in burning most of the minor actinide waste. The addition of minor actinides Am-241 and Np-237 up to 5% to the fuel also succeeded in increasing the reactivity of the reactor with the reactor still being able to operate in critical conditions.

Keywords : GFR, MCANDLE, *Zirconium*, Am-241, Np-237, SRAC

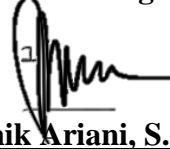
Palembang, Desember 2024

Pembimbing I,



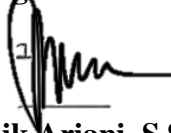
Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si.
NIP. 197002231995121002

Pembimbing II,



Dr. Menik Ariani, S.Si, M.Si.
NIP. 197211252000122001

**Mengetahui,
Koordinator Program Studi Magister Fisika**



Dr. Menik Ariani, S.Si, M.Si.
NIP. 197211252000122001

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN INTEGRITAS.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
KATA PENGANTAR	vii
RINGKASAN	ix
SUMMARY	x
DAFTAR ISI.....	xi
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL.....	xv
DAFTAR ISTILAH	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	4
1.3 Batasan Masalah.....	5
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Pembangkit listrik Tenaga Nuklir (PLTN).....	6
2.2 Reaktor Nuklir.....	7
2.3 Reaksi Nuklir.....	10
2.4 Variasi Daya Reaktor	12
2.5 Penampang Lintang (Cross Section) Reaksi Nuklir	13
2.5.1 Microscopic Cross Section (σ)	13
2.5.2 Macroscopic Cross Section (Σ).....	14
2.6 Gas-cooled Fast Reaktor (GFR)	14
2.6.1 Bahan Bakar Reaktor	16
2.6.2 Kelongsong (Cladding).....	19
2.7 Perkembangan Metode Perancangan Reaktor Nuklir.....	22
2.7.1 Reaktor CANDLE.....	22
2.7.2 Reaktor Modified CANDLE (MCANDLE)	23
2.8 Analisis Neutronik Desain Reaktor	24

2.8.1	Persamaan Difusi	24
2.8.2	Persamaan Burn-up.....	26
2.9	Parameter Neutronik.....	27
2.9.1	Faktor Multiplikasi Efektif (Keff)	27
2.9.2	Reaktivitas Teras Reaktor (ρ)	28
2.9.3	Distribusi Daya	29
2.10	Standard Reaktor Analysis Code (SRAC).....	30
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		32
3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	32
3.2	Peralatan Penelitian	32
3.3	Spesifikasi Desain GFR.....	32
3.4	Geometri Sel Bahan Bakar dan Teras Reaktor	33
3.5	Penerapan Modified CANDLE	36
3.6	Prosedur Penelitian.....	38
3.6.1	Perhitungan Sel Bahan Bakar dengan PIJ.....	38
3.6.2	Menentukan Ukuran dan Konfigurasi pada Teras Reaktor	38
3.7	Diagram Alir Perhitungan SRAC.....	39
3.8	Diagram Alir Penelitian.....	40
3.9	Parameter Survei Perhitungan Sel Bahan Bakar dan Teras Reaktor.....	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		42
4.1	Analisis Neutronik.....	42
4.2	Perhitungan pada Sel Bahan Bakar	42
4.2.1	Level Burn-up.....	43
4.2.2	Faktor Multiplikasi Tak Hingga (Kinf)	44
4.2.3	Rasio Konversi.....	46
4.2.4	Densitas Atom.....	48
4.3	Perhitngan pada Teras Reaktor.....	56
4.3.1	Faktor Multiplikasi Efektif (Keff)	57
4.3.2	Distribusi Daya	65
BAB V PENUTUP.....		70
5.1	Kesimpulan.....	70
5.2	Saran.....	71
DAFTAR PUSTAKA		72

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Reaksi Fisi Uranium 235.....	11
Gambar 2.2 Reaksi Fusi	11
Gambar 2.3 Gas Cooled Fast Reactor	16
Gambar 2. 4 Burn-Up Chain Natural Uranium.....	17
Gambar 2.4. Konsep Grup Energi Neutron.....	26
Gambar 2.5. Faktor Multiplikasi Efektif pada Teras Reaktor.....	28
Gambar 3.1. Geometri Sel Bahan Bakar	33
Gambar 3.2. Geometri dan Ukuran Teras Reaktor	34
Gambar 3.3 Geometri Teras Reaktor Arah Radial Tampak Atas	35
Gambar 3.4 Skema Susunan Bahan Bakar.....	35
Gambar 3.5 Tampak ½ Teras Skema Refueling MCANDLE	37
Gambar 3.6 Diagram Alir Perhitungan SRAC.....	39
Gambar 3.7 Diagram Alir Penelitian	40
Gambar 4.1 Level Burn-Up untuk Penambahan Am-241 0,5 – 5%	43
Gambar 4.2 Level Burn-Up untuk Penambahan Np-237 0,5 – 5%	44
Gambar 4.3 Grafik K_{inf} untuk Penambahan Am-241 0,5 – 5%	45
Gambar 4.4 Grafik K_{inf} untuk Penambahan Np-237 0,5 – 5%	45
Gambar 4.5 Grafik Rasio Konversi untuk Penambahan Am-241 0,5 – 5%	46
Gambar 4.6 Grafik Rasio Konversi untuk Penambahan Np-237 0,5 – 5%.....	47
Gambar 4.7 Grafik Densitas Atom U-235 untuk Penambahan Am-241	48
Gambar 4.8 Grafik Densitas Atom U-235 untuk Penambahan Np-237.....	49
Gambar 4.9 Grafik Densitas Atom U-238 untuk Penambahan Am-241	50
Gambar 4.10 Grafik Densitas Atom U-238 untuk Penambahan Np-237.....	51
Gambar 4.11 Grafik Densitas Atom Pu-239 untuk Penambahan Am-241	52
Gambar 4.12 Grafik Densitas Atom Pu-239 untuk Penambahan Np-237	53
Gambar 4.12 Grafik Densitas Atom Am-241 untuk Penambahan Am-241	55
Gambar 4.14 Grafik Densitas Atom Np-237 untuk Penambahan Np-237.....	56
Gambar 4.15 Grafik K_{eff} untuk Bahan Bakar U _{Zr} -0% Minor Aktinida.....	57
Gambar 4.16 Grafik Nilai K_{eff} untuk Penambahan Am-241 0 – 5%	59
Gambar 4.17 Grafik Nilai K_{eff} untuk Penambahan Np-237 0 – 5%	59
Gambar 4.18 Skema Penyusunan Bahan Bakar	66

Gambar 4.19 Distribusi Daya U _{zr} -0% Minor Aktinida Arah Aksial.....	67
Gambar 4.20 Distribusi Daya U _{zr} -0% Minor Aktinida Arah Radial.....	67
Gambar 4.21 Grafik Distribusi Daya untuk Bahan Bakar dengan Penambahan Minor Aktinida Am-241 5%; (a) Arah Aksial; (b) Arah Radial.....	68
Gambar 4.22 Grafik Distribusi Daya untuk Bahan Bakar dengan Penambahan Minor Aktinida Np-237 5%; (a) Arah Aksial; (b) Arah Radial.	68

DAFTAR TABEL

Tabel 3. 1. Jadwal Penelitian.....	32
Tabel 3. 2. Spesifikasi Parameter Desain Teras Reaktor	33
Tabel 4. 1. Persentase Densitas Atom U-235 pada Akhir Periode Burn-Up.....	50
Tabel 4. 2. Persentase Densitas Atom U-238 pada Akhir Periode Burn-Up.....	52
Tabel 4. 3. Persentase Densitas Atom Pu-239 pada Akhir Periode Burn-Up	54
Tabel 4. 4. Persentase Ekses Reaktivitas untuk Bahan Bakar Uzr-0% Minor Aktinida....	58
Tabel 4. 5. Persentase Nilai Ekses Reaktivitas untuk Penambahan Am-241 0,5 - 5%.....	60
Tabel 4. 6. Persentase Nilai Ekses Reaktivitas untuk Penambahan Np-237 0,5 - 5%.....	62
Tabel 4. 7. Perbandingan Nilai Daya Maksimum.....	69

DAFTAR ISTILAH

<i>MeV</i>	: <i>Mega Elektron Volt</i>
<i>Mwt</i>	: <i>Mega Watt Thermal</i>
<i>PPF</i>	: <i>Power Peacking Factor</i>
<i>FIMA</i>	: <i>Fissions Per Initial Metal Atom</i>
<i>Mpa</i>	: <i>Mega Pascal</i>
K_{eff}	: <i>Multiplikasi Efektif</i>
K_{inf}	: <i>Multiplikasi Infinitif</i>
<i>JAERI</i>	: <i>Japan Atomic Energy Reactor Institute</i>
<i>JENDL</i>	: <i>Japanese Evaluated Nuclear Data Library</i>
<i>IEA</i>	: <i>International Energy Agency</i>
<i>SRAC</i>	: <i>Srandard Reactor Analysis Code</i>
<i>CANDLE</i>	: <i>Constant Axial Shape of Neutron Flux, Nuclide Density and Power Shape During Life of Energy Production</i>
<i>MWd</i>	: <i>Mega Watt Day</i>
<i>IAEA</i>	: <i>International Atomic Energy Association</i>

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Jumlah kebutuhan energi dunia di waktu mendatang diprediksi akan bertambah hingga dua kali lipat, energi ini tentunya diperlukan sebagai pasokan untuk menopang tingkat kesejahteraan manusia di dunia (Asif & Muneer, 2007). Oleh karena itu, diperlukan solusi untuk mengatasi permasalahan pemenuhan kebutuhan energi, salah satunya adalah dengan membangun PLTN (Anggoro et al., 2013). PLTN dinilai sebagai pilihan energi alternatif karena memiliki keunggulan dibandingkan dengan pembangkit energi lainnya yang ada pada saat ini. Salah satu keunggulannya adalah harga yang ekonomis dengan masa pakai yang lama (Anggoro, Dewi, Nurlaila, et al., 2013a dan Bogheiry et al., 2022). Selain itu PLTN dianggap lebih ramah lingkungan karena tidak menghasilkan gas buang yang dapat mengakibatkan efek rumah kaca (CO₂) pada lingkungan global (Rahmanta et al., 2023 dan Brook et al., 2014). Data terkini menurut International Atomic Energy Association (IAEA) terdapat sejumlah 413 unit reaktor daya (PLTN) yang aktif beroperasi di 30 negara dengan total kapasitas terpasang sebesar 400 GWe.

Dewasa ini, penelitian dan pengembangan terhadap reaktor terus dilakukan untuk mendapatkan reaktor generasi maju yang inovatif dengan keselamatan tinggi, menggantikan generasi yang ada sekarang ini (Gen III/ Gen III+)(P. et al., 2013). Hingga saat ini, perkembangan teknologi PLTN tersebut telah mencapai tahap penelitian dan pengembangan PLTN Generasi IV (sistem reaktor maju) yang merupakan pengembangan inovatif dari PLTN generasi sebelumnya (Locatelli et al., 2013). Jenis-jenis dari PLTN Generasi IV tersebut adalah (1) Gas-cooled Fast Reaktor(GFR)(Čížek et al., 2021), (2) Lead-cooled Fast Reaktor (LFR)(Cai et al., 2022), (3) Sodium-cooled Fast Reaktor (SFR)(Yang et al., 2021), (4) Molten Salt Reaktor (MSR) (Wan et al., 2020), (5) Supercritical Water-cooled Reaktor (SCWR) (Huang et al., 2021) dan (6) Very High Temperature Reaktor (VHTR) (Hu et al., 2021) . Dibandingkan dengan generasi sebelumnya, Reaktor Nuklir Generasi IV di nilai lebih unggul dalam bidang keamanan dan kehandalan, ramah lingkungan memberikan udara yang bersih dan meningkatkan ketersediaan jangka panjang

sistem, memiliki tingkat risiko keuangan yang kompetitif, lebih aman terhadap pencurian bahan senjata nuklir, dan memberikan peningkatan perlindungan fisik terhadap aksi terorisme (Abram & Ion, 2008 dan Anggoro, Dewi, Nurlaila, et al., 2013).

Gas-Cooled Fast Reactor (GFR) merupakan Salah satu jenis reaktor generasi IV. GFR menempati peringkat teratas dalam sistem keberlanjutan karena memiliki siklus bahan bakar tertutup dan kinerja yang sangat baik dalam manajemen aktinida (Gafar Abdullah et al., 2009). Selain itu, secara umum GFR juga dinilai memiliki peringkat yang baik dalam keselamatan, kehandalan, ekonomi, pencegahan pemanfaatan senjata nuklir dan proteksi fisik. Sedangkan dalam penggunaan bahan bakar, spektrum cepat GFR memungkinkan untuk menggunakan bahan bakar yang dapat langsung membelah (*fissile*) dan bahan bakar yang tidak dapat langsung membelah (*fertile*) (Anggoro, Dewi, Nurlaila, et al., 2013a). Bahan bakar yang umumnya digunakan pada reaktor nuklir adalah uranium alam yang diperkaya, uranium alam ini melalui proses pengayaan untuk meningkatkan konsentrasi isotop uranium 235 (U-235) yang bersifat fisil. Proses pengayaan ini akan menambah kadar U-235 pada uranium alam dari yang sebelumnya 0,7 % menjadi 3-5 % (Kazansky & Slekenichs, 2018).

Penggunaan uranium sebagai bahan bakar reaktor juga bervariasi, uranium biasanya dicampur dengan bahan lain untuk meningkatkan efisiensinya pada reaktor. Jenis-jenis uranium ini antara lain uranium Dioxide (UO₂) yang dikenal memiliki efisiensi dan kestabilan pada suhu tinggi yang baik pada reaktor jenis air, uranium Metal atau uranium logam yang memiliki densitas tinggi, Mixed Oxide (MOX) yang merupakan campuran dari plutonium dan uranium, TRISO (TRIStructural ISOtropic) yang merupakan bahan bakar dari butiran uranium yang dilapisi pelindung, uranium Silicide (U₃Si₂) yang biasanya digunakan pada reaktor riset, dan uranium metallic atau uranium Zirkonium (UZr) yang saat ini masih dalam tahap pengembangan dan dinilai memiliki performa yang baik dan mampu mencegah reaktor dari kerusakan sehingga mampu meningkatkan keselamatan saat operasional reaktor (Darmawati et al., 2020).

Selain jenis bahan bakar, penambahan unsur lain pada bahan bakar juga dilakukan untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas bahan bakar. Salah satunya adalah dengan penambahan unsur minor aktinida. Minor aktinida merupakan unsur yang terbentuk dari bekas bahan bakar reaktor nuklir. Unsur minor aktinida terdiri atas americium (Am), Neptunium (Np), dan curium (Cm). Penambahan minor aktinida pada bahan bakar reaktor nuklir memberikan dampak terhadap performa sel bahanbaar diantaranya mempengaruhi nilai K_{inf} , mengubah tingkat *Burn-up*, mengubah densitas atom U-235, U238, dan Pu239, dan mempengaruhi rasio konversi (Gontina et al, 2022). Sebagai bahan sisa pembakaran, minor aktinida tentunya dapat memberikan dampak positif terhadap operasional reaktor terutama dalam mengurangi dampak radioaktif jangka panjang dari limbah nuklir. Selain itu juga, Unsur minor aktinida karena umurnya yang panjang sehingga mampu memberikan sifat radiotoksisitas dalam bahan bakar bekas reaktor nuklir (Gontina et al., 2022).

Penelitian mengenai desain teras reaktor berbasis bahan bakar *uranium metallic* sebagai bahan bakar pernah dilakukan seperti desain teras *Gas-cooled Fast Reactor* yang berpendingin S-CO₂ dengan menggunakan bahan bakar uranium Metalik Alam. Reaktor GFR didesain dengan strategi pembakaran MCANDLE dan dilakukan perhitungan neutronik teras reaktor dengan menggunakan kode SRAC. Hasil menunjukkan nilai K_{eff} pada awal perhitungan menunjukkan angka 1,0490 dan pada akhir siklus menunjukkan angka 1,0598 yang artinya nilai K_{eff} dinilai konstan dan berada pada ambang yang cukup baik atau posisi kritis. Hasil reaktivitas rata-rata selama waktu operasi reaktor menunjukkan angka 0,0562 dan disimpulkan desain reaktor ini layak untuk beroperasi (Darmawati et al., 2020). Penelitiannya juga telah dilakukan dengan judul desain teras reaktor GCFR berbahan bakar uranium nitrit dengan minor aktinida, reaktor didesain dengan daya keluaran 500 MWt dibakar dengan metode MCANDLE arah radial 8 region. Reaktor didesain untuk dapat beroperasi selama 120 tahun dengan setiap 15 tahun waktu *refueling*. Berdasarkan hasil penelitiannya didapatkan hasil nilai K_{eff} sebesar 1,0893 dan 1,0915, hasil ini menunjukkan perlu adanya optimasi kembali pada teras reaktor (Gontina et al, 2022).

Kemudian penelitian desain teras reaktor yang menggunakan pendingin S-CO₂ juga pernah dilakukan seperti penelitian desain teras reaktor HTGR model mesh triangular dua dimensi bahan bakar thorium berpendingin gas CO₂ (Dilaga et al., 2019). Hasil yang diperoleh menunjukkan desain teras reaktor HTGR yang ideal dengan ukuran kolom (x) 202 cm dan baris (y) 101 cm. Persentase pengayaan bahan bakar bagian pertama sebesar 3% dan bahan bakar bagian kedua 2,731%. Desain teras reaktor ini menghasilkan daya termal sebesar 100 MWth, rapat daya maksimal sebesar 107,5371 watt/cm³ dan nilai keff 1,000008. Juga dilakukan pada penelitian Studi desain reaktor air bertekanan (PWR) berukuran kecil berumur panjang berbahan bakar thorium (Subkhi et al., 2015), dengan menerapkan strategi pemanfaatan siklus thorium, bahan bakar yang tight lattice dan penambahan protactinium dapat menghasilkan teras berumur panjang dengan pengurangan excess reactivity selama waktu optimum operasi 6 tahun. Kemudian optimasi PWR kecil berdaya 350 MWt berumur panjang berbahan bakar thorium nitrida menghasilkan *excess reactivity* rendah 0.5% dk/k. Optimasi teras *long-life* PWR untuk menganalisa aspek *burn-up* dan distribusi daya juga perlu dilakukan agar dapat beroperasi 10 tahun atau lebih. Selain itu terdapat juga penelitian desain reaktor GFR berbasis bahan bakar uranium plutonium nitride (U,Pu)(Novalianda, 2019). Berdasarkan penelitian tersebut proses *power flattening* teras reaktor dilakukan dengan mengatur arah radial tiga region fraksi volume bahan bakar yaitu 55%, 60% dan 65%. Nilai *Average power density* teras reaktor yang dimodifikasi adalah 28,46 Watt/cc dan *power peaking factor* menurun dari 2,25 menjadi 1,98. Penelitian peningkatan kinerja usia reaktor GFR dengan Modified CANDLE arah radial berpendingin yang diperkaya (Charoline et al., 2023) juga telah dilakukan, membagi teras reaktor menjadi 6 region dengan volume yang sama arah radial. Berdasarkan penjelasan di atas, peneliti tertarik untuk melakukan penelitian untuk mendesain neutronik reaktor cepat berpendingin gas S-CO₂ dengan bahan bakar *uranium metallic* dengan penambahan minor aktinida.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini difokuskan pada analisis desain teras reaktor cepat berpendingin gas S-CO₂ dengan bahan bakar berupa uranium metalik dengan penambahan minor aktinida. Reaktor didesain dengan daya termal keluaran 500

MWTh dengan strategi pembakaran yang dilakukan yaitu dengan menerapkan strategi *burn-up* MCANDLE arah radial. Dilakukan perhitungan neutronik untuk melihat tingkat kekritisan pada teras reaktor.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini terbatas pada analisis desain reaktor cepat berpendingin gas (GFR) S-CO₂ dengan bahan bakar berupa *uranium metallic* dengan penambahan minor aktinida. Daya termal keluaran digunakan sebesar 500 MWTh dengan strategi pembakaran menerapkan strategi *burn-up* MCANDLE dengan arah *shuffling* radial.

1.4 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis desain teras reaktor berpendingin gas (GFR) S-CO₂ menggunakan bahan bakar berupa *uranium metallic* dengan penambahan minor aktinida dengan daya termal keluaran digunakan sebesar 500 MWTh menggunakan strategi *burn-up* MCANDLE dengan skema *shuffling* arah radial.
2. Mendapatkan faktor multiplikasi efektif (K_{eff}), faktor multiplikasi *infinite* (K_{inf}) *level burn-up*, rasio konversi, densitas atom, dan distribusi daya yang merata pada teras reaktor sebagai parameter acuan untuk mengetahui performa dan kekritisan sel bahan bakar dan teras pada reaktor.

1.5 Manfaat Penelitian

1. Diharapkan dapat dijadikan bahan rujukan dalam perkembangan penelitian energi baru yang murah dan ramah lingkungan berbasis reaktor nuklir berdaya rendah yang potensial sekali dikembangkan di Indonesia.
2. Dapat dijadikan sebagai peneliti lain untuk melakukan penelitian terkait.
3. Analisis neutronik yang dihasilkan dapat menjadi bahan rujukan untuk analisis termal hidrolik dan keselamatan

DAFTAR PUSTAKA

- Abram, T., & Ion, S. (2008). Generation-IV nuclear power: A review of the state of science. *Energy Policy*, 36(12). <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.059>
- Asif, M., & Muneer, T. (2007). Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 11, Issue 7, pp. 1388–1413). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.12.004>
- Aslina Br.Ginting, M. Husna Al Hasa, M. (2007). Analisis Sifat Termal Paduan AlFeNi Sebagai Kelongsong Bahan Bakar Reaktor Riset. *J. Tek. Bhn. Nukl.*, 3.
- Ayu, A. A., Yulianti, Y., Posman Manurung, dan, Soemantri Brojonegoro No, J., & Meneng Bandar Lampung, G. (2018). Analisis Termal-hidrolik Reaktor Cepat Berpendingin Gas (Gas Cooled Fast Reaktor) Menggunakan Metode Runge Kutta. In *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika* (Vol. 06, Issue 02).
- Bogheiry, A., Faisal, A. A., & Sunarno, S. (2022). Nuclear energy as environmentally friendly energy and international politics. *JPPI (Jurnal Penelitian Pendidikan Indonesia)*, 8(2), 488. <https://doi.org/10.29210/020221356>
- Brook, B. W., Alonso, A., Meneley, D. A., Misak, J., Blee, T., & van Erp, J. B. (2014). Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix. *Sustainable Materials and Technologies*, 1, 8–16. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2014.11.001>
- Cai, Y., Chen, K., Zhou, W., & Gu, L. (2022). Multiphysics thermo-mechanical behavior modeling for annular uranium-plutonium mixed oxide fuels in a lead-cooled fast reactor. *Frontiers in Energy Research*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.993383>
- Charoline, R., Yulianti, Y., Riyanto, A., & Karo-karo, P. (2023). Analisis *Burn-up* Modified Candle Pada Gas Cooled Fast Reactor (Gcfr) Dengan Bahan Bakar uranium Oksida. *Jurnal Teori Dan Aplikasi Fisika*, 11(01). <https://doi.org/10.23960/jtaf.v11i1.3233>

- Chu, W., Bennett, K., Cheng, J., & Chen, Y.-T. (2018). A review of supercritical CO₂ Brayton cycle using in renewable energy applications. *Renewable Energy and Sustainable Development*, 4(1). <https://doi.org/10.21622/resd.2018.04.1.014>
- Cinantya, D., & Fitriyani, D. (2014). ANALISIS NEUTRONIK PADA REAKTOR CEPAT DENGAN VARIASI BAHAN BAKAR (UN-PuN, UC-PuC DAN MOX). *Jurnal Fisika Unand*, 3(1).
- Čížek, J., Kalivodová, J., Janeček, M., Stráský, J., Srba, O., & Macková, A. (2021). Advanced structural materials for gas-cooled fast reactors—a review. In *Metals* (Vol. 11, Issue 1). <https://doi.org/10.3390/met11010076>
- Darmawati, R., Ariani, M., & Monado, F. (2020). Desain Konseptual Teras Reaktor Cepat Berumur panjang Berpendingin S-CO₂ dengan Bahan Bakar uranium Metalik Alam. *Jurnal Fisika Unand*, 9(3). <https://doi.org/10.25077/jfu.9.3.401-407.2020>
- Denisa, T., Ionut, N. A., & Nicu, B. (2022). Generation IV Nuclear Energy Systems- Alternative Solutions to Carbon Emission Energy Sources. *2022 14th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI 2022*. <https://doi.org/10.1109/ECAI54874.2022.9847457>
- Dilaga, N. M., Yulianti, Y., & Riyanto, A. (2019). Desain Teras Reaktor High Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR) Model Mesh Triangular Dua Dimensi Berbahan Bakar thorium Berpendingin Gas CO₂. *Teori Dan Aplikasi Fisika*, 07(01).
- Duderstadt, J. J., Hamilton, L. J., Moorthy, S., & Scott, C. C. (2008). Nuclear Reactor Analysis by James J. Duderstadt and Louis J. Hamilton. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 24(4). <https://doi.org/10.1109/tns.1977.4329141>
- Fitriyani, D., & Handayani Irka, F. (2016). Analisis Neutronik pada Gas Cooled Fast Reactor (GCFR) dengan Variasi Bahan Pendingin (He, CO₂, N₂). *Jurnal Fisika Unand*, 5(1).
- Gafar Abdullah, A., Su, Z., & Yulianti, Y. (2009). *SIMULASI KECELAKAAN REAKTOR NUKLIR JENIS GAS COOLED FAST REACTOR*.

- Gontina, W., Monado, F., & Ariani, M. (2022). Studi Parameter *Burn-up* Sel Bahan Bakar uranium Nitrit Dengan Penambahan minor aktinida Berpendingin S-CO₂. *Jurnal Penelitian Sains*, 24(3). <https://doi.org/10.56064/jps.v24i3.744>
- Handayani, H., Yulianti, Y., & Manurung, P. (2020). Perhitungan *Burn-up* pada Reaktor HCLWR Model Geometri Kotak Tiga Dimensi dengan Bahan Bakar thorium Menggunakan Kode COREBN. *Jurnal Fisika Indonesia*, 24(2). <https://doi.org/10.22146/jfi.v24i2.57167>
- Hoang, V. K., Nishiyama, J., & Obara, T. (2018). Design concepts of small CANDLE reaktor with melt-refining process. *Progress in Nuclear Energy*, 108. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2018.05.019>
- Hu, Q., Yuan, K., Peng, W., Zhao, G., & Wang, J. (2021). A numerical study of heat transfer enhancement by helically corrugated tubes in the intermediate heat exchanger of a very-high-temperature gas-cooled reactor. *Nuclear Engineering and Design*, 380. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2021.111275>
- Huang, Y., Zang, J., & Leung, L. K. H. (2021). Supercritical Water-Cooled Reaktor (SCWR). In *Encyclopedia of Nuclear Energy*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819725-7.00020-9>
- IAEA. (2010). Research Reactors: Purpose and Future. *IAEA, Vienna International Centre Austria*.
- Irka, F. H., Su'ud, Z., Irwanto, D., Khotimah, S. N., & Sekimoto, H. (2023). Analisis Kekritisian dan Rasio Konversi Reaktor Cepat Berpendingin Gas dengan Variasi Fraksi Bahan Bakar UN-PuN Menggunakan Skema *Burn-up* Modified CANDLE Arah Radial. *Newton-Maxwell Journal of Physics*, 4(1). <https://doi.org/10.33369/nmj.v4i1.27127>
- Kang, Y., Leng, X., Zhao, L., Bai, B., Wang, X., & Chen, H. (2023). Review on the Corrosion Behaviour of Nickel-Based Alloys in Supercritical Carbon Dioxide under High Temperature and Pressure. In *Crystals* (Vol. 13, Issue 5). <https://doi.org/10.3390/cryst13050725>

- Kazansky, Y., & Slekenichs, Y. (2018). Power coefficient of reactivity: definition, interconnection with other coefficients of reactivity, evaluation of results of transients in power nuclear reactors. *Nuclear Energy and Technology*, 4(2). <https://doi.org/10.3897/nucet.4.30663>
- Kurniawan, N. I., Hasanah, M., & Pamungkas, W. A. (2023). The Challenges of Nuclear Power Plant Development in Indonesia: A Case of thorium Power Plant in Bangka Island, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1199(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1199/1/012014>
- Locatelli, G., Mancini, M., & Todeschini, N. (2013). Generation IV nuclear reactors: Current status and future prospects. *Energy Policy*, 61, 1503–1520. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.06.101>
- Lusiana, L., Sasongko, N. A., & Supriyadi, I. (2023). Scenario mitigation of threats and disruptions to the development plan of Nuclear Power Plan (NPP) in Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1267(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1267/1/012008>
- Malik, U., Kothari, L. S., & Kumar, A. (1982). Neutron Diffusion in Graphite Poisoned with $1/v$ and Non- $1/v$ Absorbers. *Nuclear Science and Engineering*, 81(1). <https://doi.org/10.13182/nse82-a19600>
- Mazauric, A. L., Sciora, P., Pascal, V., Droin, J. B., Bésanger, Y., Hadjsaïd, N., Tran, Q. T., & Guyonneau, N. (2022). Simplified approach to determine the requirements of a “flexible nuclear reactor” in power sistem with high insertion of variable renewable energy sources. *EPJ Nuclear Sciences and Technologies*, 8. <https://doi.org/10.1051/epjn/2021026>
- Meilasari, F., & Sutrisno, H. (2019). PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA NUKLIR (PLTN). *Prosiding Seminar Nasional Infrastruktur Energi Nuklir*.
- Mermoux, M., & Duriez, C. (2023). High Temperature Oxidation of Zircaloy-4 Under Conditions Simulating a Loss of Cooling Accident in Spent Fuel Pools Examined with Raman Imaging and 18 o Tracer Techniques. *ECS Meeting Abstracts*, MA2023-02, 1105. <https://doi.org/10.1149/MA2023-02121105mtgabs>

- Mitev, M., & Filipov, K. (2023). Feasibility Study for Minor Actinides Transmutation in Conventional Power Reactors. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1234(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1234/1/012016>
- 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). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1568/1/012013>
- Novalianda, S. (2019). Cetak) Sari Novalianda, Power Flattening. In *Journal of Electrical Technology* (Vol. 4, Issue 3).
- Novalianda, S., Sihombing, P. M., & Hulu, F. N. (2022). *STUDI DESAIN SEL BAHAN BAKAR THORIUM NITRIDE (ThN) PADA GAS-COOLED FAST REACTOR* (Vol. 7, Issue 2).
- OECD/AIEA. (2023). uranium 2022: Resources, Production and Demand. *Nuclear Energy Agency and the International Atomic Energy Agency*.
- P., J., Rivero Oliva, J. de J., & Frutuoso de Melo, P. F. F. (2013). Generation IV Nuclear Systems: State of the Art and Current Trends with Emphasis on Safety and Security Features. In *Current Research in Nuclear Reactor Technology in Brazil and Worldwide*. InTech. <https://doi.org/10.5772/53140>
- Paetz Gen. Schieck, H. (2014). Introduction: Role of nuclear reactions in nuclear and particle physics. *Lecture Notes in Physics*, 882(1). https://doi.org/10.1007/978-3-642-53986-2_1
- Parhizkari, H., Aghaie, M., Zolfaghari, A., & Minucmehr, A. (2015). An approach to stability analysis of spatial xenon oscillations in WWER-1000 reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 79. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.01.026>
- Putri, E. Y., Shafii, M. A., Irka, F. H., & Su'ud, Z. (2017). Analisis Kekritisian Sodium-Cooled Fast Reactor (SFR) Berdasarkan Variasi Daya Keluaran. *Jurnal Fisika Unand*, 7(1), 45–49. <https://doi.org/10.25077/jfu.7.1.45-49.2018>

- Rahmadya Guskha, C., Shaffii, M. A., Handayani Irka, F., & Su'ud, Z. (2016). Analisis Densitas Nuklida Lead-Bismuth Cooled Fast Reactor (LFR) Berdasarkan Variasi Daya Keluaran. *Jurnal Fisika Unand*, 5(1).
- Rahmanta, M. A., Harto, A. W., Agung, A., & Ridwan, M. K. (2023). Nuclear Power Plant to Support Indonesia's Net Zero Emissions: A Case Study of Small Modular Reactor Technology Selection Using Technology Readiness *Level* and *Levelized Cost of Electricity Comparing Method*. *Energies*, 16(9). <https://doi.org/10.3390/en16093752>
- Rohanda, A. (2013). ANALISIS KANDUNGAN RADIONUKLIDA PADA INVENTORI BAHAN BAKAR BEKAS REAKTOR PWR 1000 MWe DENGAN MENGGUNAKAN ORIGEN-ARP. *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah*, 16(3).
- Ron E. Martin. (2003). Enrico Fermi: The First Chain Reactor (with Film) and Pion-Proton Scattering. *INIS Repository*.
- Saputra, D. R., Yulianti, Y., & Agus, R. (2019). Studi desain high temperature gas-cooled reactor (HTGR) berpendingin gas hidrogen menggunakan bahan bakar thorium. *Jurnal Teori Dan Aplikasi Fisika*, 07(01).
- Sekimoto, H. (2007). *Nuclear Reactor Theory*. COE-INES Tokyo Institute of Technology.
- Stainsby, R., Peers, K., Mitchell, C., Poette, C., Mikityuk, K., & Somers, J. (2009). Gas cooled fast reactor research and development in the European Union. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2009. <https://doi.org/10.1155/2009/238624>
- Subkhi, M. N., Suud, Z., Waris, A., & Permana, S. (2015). *STUDI DESAIN REAKTOR AIR BERTEKANAN (PWR) BERUKURAN KECIL BERUMUR PANJANG BERBAHAN BAKAR THORIUM*. IX(1).
- Syarifah, R. D., Arkundato, A., Irwanto, D., & Su'ud, Z. (2020). Neutronic analysis of comparison UN-PuN fuel and ThN fuel for 300MWth Gas Cooled Fast Reactor long life without refueling. *Journal of Physics: Conference Series*, 1436(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012132>

- Toma, D., Nitu, A. I., Bizon, N., Stoica, L., Radu, V., Ionescu, V., Jinga, A., Olaru, V., & Matei, M. (2023). Preliminary Study on the Application for Monitoring Work Parameters in the Experimental Testing Facility under the Operating Conditions Generation IV Nuclear Reactors. *15th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence, ECAI 2023 - Proceedings*. <https://doi.org/10.1109/ECAI58194.2023.10194103>
- V. Vataman, T. Petik, & K. Beglov. (2023). ANALYSIS OF MODELS OF AN AUTOMATIC POWER CONTROL SISTEM FOR A PRESSURIZED WATER REACTOR IN DYNAMIC MODE WITH A CHANGE IN THE STATIC CONTROL PROGRAM. *Proceedings of Odessa Polytechnic University, Issue 1(67)*, 60–73.
- Wakabayashi, G., Yamada, T., Endo, T., & Pyeon, C. H. (2023). Introduction to Nuclear Reactor Experiments. In *Introduction to Nuclear Reactor Experiments*. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-6589-0>
- Wan, C., Hu, T., & Cao, L. (2020). Multi-physics numerical analysis of the fuel-addition transients in the liquid-fuel molten salt reaktor. *Annals of Nuclear Energy*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2020.107514>
- Widiawati, N., Su'ud, Z., Irwanto, D., Permana, S., Takaki, N., & Sekimoto, H. (2021). Enhancing the performance of a long-life modified CANDLE fast reaktor by using an enriched 208Pb as *coolant*. *Nuclear Engineering and Technology*, 53(2). <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.07.008>
- Widiawati, N., Su'ud, Z., Irwanto, D., Permana, S., Takaki, N., & Sekimoto, H. (2022). Design study of 208Pb-Bi eutectic-cooled reaktor with natural uranium as fuel cycle input with radial fuel *shuffling*. *Annals of Nuclear Energy*, 171. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109003>
- Wisesa, P. W. (2011). Upaya Jerman Dalam Menanggulangi Pemanasan Global. *Eprints.Upnyk*, 151040295.
- Yan, M., Zhang, Y., & Chai, X. (2012). Optimized design and discussion on middle and large CANDLE reaktors. *Sustainability*, 4(8). <https://doi.org/10.3390/su4081888>

- Yang, H., Yang, X., Yang, J., Zhao, Q., Wang, X., Chong, D., Tang, C., & Jiang, C. (2021). Preliminary design of an SCO₂ conversion sistem applied to the sodium cooled fast reactor. *Frontiers in Energy*, 15(4). <https://doi.org/10.1007/s11708-021-0777-5>
- Yulianti, Y., & Sembiring, S. (2019). Desain Inti Reaktor Supercritical Water Reactor (SCWR) Model Teras Silinder (r, z) dengan Bahan Bakar thorium Hasil Daur Ulang. In *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika* (Vol. 07, Issue 02).
- Yunanda, W. W., & Shafii, M. A. (2019). Analisis Koefisien Difusi Neutron terhadap Jarak Ekstrapolasi dalam Persamaan Difusi Multigrup Satu Dimensi. *Jurnal Fisika Unand*, 8(4). <https://doi.org/10.25077/jfu.8.4.362-367.2019>
- Yusi, Y., & Muhammad, I. (2013). Manajemen pengoperasian reaktor RSG GAS. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Dan Aplikasi Reaktor Nuklir*, 53(9).
- Zhang, Z. Y., Dong, Y. J., Shi, Q., Li, F., & Wang, H. T. (2022). 600-MWe high-temperature gas-cooled reactor nuclear power plant HTR-PM600. *Nuclear Science and Techniques*, 33(8). <https://doi.org/10.1007/s41365-022-01089-9>