

**SIMULASI OPTIMASI DAYA TERMAL DAN UKURAN TERAS PADA
REAKTOR CEPAT BERPENDINGIN KARBONDIOKSIDA SUPERKRITIS
(S-CO₂)**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat memperoleh gelar

Sarjana Sains Bidang Studi Fisika



Oleh :

DELIA RAHMAH HILMAN

NIM. 08021381924067

JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS SRIWIJAYA

2023

LEMBAR PENGESAHAN

**SIMULASI OPTIMASI DAYA TERMAL DAN UKURAN TERAS PADA
REAKTOR CEPAT BERPENDINGIN KARBONDIOKSIDA SUPERKRITIS
(S-CO₂)**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Sains Bidang Studi Fisika

Disusun oleh:

DELIA RAHMAH HILMAN

NIM. 08021381924067

Indralaya, 31 Juli 2023

Menyetujui,

Pembimbing II



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

NIP. 19721125200012200

Pembimbing I



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

NIP. 197002231995121002

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika



Dr. Fringsyah Virgo, S.Si., M.T.

NIP. 197009101994121001

PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Delia Rahmah Hilman

NIM : 08021381924067

Judul TA : Simulasi Optimasi Daya Termal dan Ukuran Teras Pada Reaktor Cepat Berpendingin Karbondioksida Superkritis (S-CO₂)

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi yang telah 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.

Demikianlah 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, Juli 2023

Yang menyatakan



Delia Rahmah Hilman

NIM. 08021381924067

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat rahmat dan karunia-Nya tugas akhir dengan judul **“Simulasi Optimasi Daya Termal dan Ukuran Teras Pada Reaktor Cepat Berpendingin Karbondioksida Superkritis (S-CO₂)”** dapat diselesaikan dengan baik guna memenuhi persyaratan program sarjana di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya.

Dalam kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terima kasih atas bantuan dan dukungan dari berbagai pihak yang telah berkontribusi secara tidak langsung dari awal proses penelitian hingga selesai. Secara khusus penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah SWT, yang atas karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan laporan penelitian ini.
2. Keluarga penulis, Bapak, Mama, dan adik-adik yang senantiasa memberikan dukungan serta do'a terbaiknya.
3. Bapak Dr. Frinsyah Virgo, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Sriwijaya.
4. Bapak Dr. Fiber Monado, S.Si., M.Si. dan Ibu Dr. Menik Ariani, S.Si., M.Si. selaku pembimbing Tugas Akhir sehingga penulis dapat menyelesaikan penelitian ini.
5. Bapak Dr. Supardi, M.Si. dan Bapak Drs. Pradanto P, DEA. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan kepada penulis sehingga tugas akhir ini dapat lebih baik.
6. Ibu Dr. Siti Sailah, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing akademik.
7. Seluruh dosen pengajar di Jurusan Fisika yang telah memberikan ilmu kepada penulis selama menjalani pendidikan di Jurusan Fisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam.
8. Sahabat fisika dan teman bertukar pikiran selama penelitian Ayu, Daril, Dina, Dwi, dan Nurhidayah yang telah membantu dan membersamai penulis dari awal hingga menyelesaikan skripsi ini.

9. Keluarga fisika khususnya angkatan 2019 (GHOST 19), terima kasih karena telah kebersamai perjuangan menuju S.Si.
10. Kepada seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu yang telah membantu penulis hingga dapat menyelesaikan penulisan skripsi ini.

Indralaya, Juli 2023

Penulis

Delia Rahmah Hilman

NIM. 08021381924067

**SIMULASI OPTIMASI DAYA TERMAL DAN UKURAN TERAS PADA
REAKTOR CEPAT BERPENDINGIN KARBONDIOKSIDA
SUPERKRITIS (S-CO₂)**

Oleh:

Delia Rahmah Hilman

NIM. 08021381924067

ABSTRAK

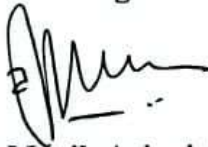
Penelitian ini mengkaji terkait optimasi daya termal dan ukuran teras pada reaktor jenis GFR dengan bahan bakar uranium metalik alam (U-10%wt Zr), berpendingin karbondioksida superkritis (S-CO₂), dan *cladding* berbahan *stainless steel* 316 dengan daya termal 500 MWt. Penelitian ini menggunakan strategi pembakaran *modified* CANDLE dimana teras reaktor dibagi menjadi 10 *region* secara radial dengan volume yang sama. Proses perhitungan difusi dan *burnup* dilakukan menggunakan program SRAC JENDL-4.0 dengan modul PIJ dan CITATION. Hasil optimasi menunjukkan bahwa reaktor dengan tinggi teras aktif 150 cm dapat menggunakan bahan bakar dengan variasi fraksi volume 60%, 62,5% dan 65%. Desain tersebut dapat dioperasikan selama 15 tahun tanpa pengisian bahan bakar.

Kata kunci: GFR, uranium metalik alam, *modified* CANDLE, SRAC.

Indralaya, 31 Juli 2023

Menyetujui,

Pembimbing II



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

NIP. 19721125200012200

Pembimbing I



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

NIP. 197002231995121002

**Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika**



Dr. Frinsyah Virgo, S.Si., M.T.

NIP. 197009101994121001

**SIMULATION OF THERMAL POWER AND CORE SIZE OPTIMATION
IN SUPERCRITICAL CARBONDIOXIDE (S-CO₂) COOLED FAST
REACTOR**

By:

Delia Rahmah Hilman

NIM. 08021381924067

ABSTRACT

This research study of the optimation of thermal power and core size in a GFR type reactor with natural metallic uranium fuel (U-10%wt Zr), supercritical carbon dioxide (S-CO₂) as a coolant, and cladding made of stainless steel 316 with a thermal power of 500 MWt. This research uses a modified CANDLE burnup strategy where the reactor core is divided into 10 regions radial with the same volume. The process of calculations diffusion and burnup is carried out using the SRAC JENDL-4.0 program with the PIJ and CITATION modules. Optimization results show that a reactor with an active core height of 150 cm can use fuel with a volume fraction variation of 60%, 62.5% and 65%. The design can be operated for 15 years without refueling.

Keywords: GFR, natural metallic uranium, modified CANDLE, SRAC.

Indralaya, 31 Juli 2023

Menyetujui,

Pembimbing II



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

NIP. 19721125200012200

Pembimbing I



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

NIP. 197002231995121002

Mengetahui,

Ketua Jurusan Fisika



Dr. Frinsyah Virgo, S.Si., M.T.

NIP. 19700901994121001

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI.....	viii
DAFTAR GAMBAR.....	x
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR ISTILAH	xiii
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Batasan Masalah	2
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).....	4
2.2. Reaktor Nuklir	5
2.3. Gas-cooled Fast Reactor (GFR).....	5
2.4. Bahan Bakar Nuklir (<i>Fuel</i>)	6
2.5. Pendingin (<i>Coolant</i>).....	7
2.6. Reaksi Fisi.....	8
2.7. Analisis Neutronik.....	9
2.7.1. Persamaan Transport Neutron	9
2.7.2. Penampang Lintang Nuklir.....	10
2.7.3. Persamaan Difusi	10
2.7.4. Persamaan <i>Burnup</i>	11
2.7.5. Faktor Multiplikasi	12
2.8. CANDL.....	13
2.9. SRAC (<i>Standard Reactor Analysis Code</i>).....	14

BAB III METODOLOGI PENELITIAN	19
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	19
3.2. Alat dan Bahan	19
3.3. Metode Penelitian.....	19
3.4. Diagram Alir Penelitian.....	20
3.5. Parameter Desain Teras Reaktor	22
3.6. Geometri Sel Bahan Bakar.....	22
3.7. Geometri Teras.....	23
3.8. Parameter Survei	24
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	25
4.1. Hasil Perhitungan Sel Bahan Bakar.....	25
4.1.1. Level <i>Burnup</i>	25
4.1.2. Faktor Multiplikasi Tak Hingga (K_{inf}).....	26
4.1.3. Densitas Atom.....	27
4.1.4. Conversion Ratio (CR).....	28
4.2. Hasil Perhitungan Teras Reaktor.....	29
4.2.1. Faktor Multiplikasi Efektif (K_{eff}).....	29
4.2.2. Distribusi Daya Arah Radial.....	31
BAB V PENUTUP	35
5.1. Kesimpulan	35
5.2. Saran.....	35
DAFTAR PUSTAKA	36
LAMPIRAN.....	40

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Prinsip Kerja PLTN Menggunakan Reaktor Air Didih.....	4
Gambar 2.2. <i>Gas Cooled Fast Reactor</i> (GFR).....	6
Gambar 2.3. Reaksi fisi berantai	8
Gambar 2.4. Prinsip keseimbangan nuklida A.....	12
Gambar 2.5. Faktor multiplikasi neutron (k) terhadap waktu (s).....	13
Gambar 2.6. Skema <i>burnup modified</i> CANDLE arah radial	14
Gambar 2.7. Struktur sistem SRAC	17
Gambar 2.8. <i>Lattice geometry available by collision probability method routine</i>	18
Gambar 3.1. Langkah kerja penelitian	20
Gambar 3.2. Diagram alir perhitungan sel bahan bakar dan teras reaktor	21
Gambar 3.3. Geometri sel bahan bakar	22
Gambar 3.4. Geometri dan ukuran teras reaktor	23
Gambar 4.1. Perubahan <i>level burnup</i> selama 150 tahun.....	25
Gambar 4.2. Nilai faktor multiplikasi tak hingga (k_{inf}) sel bahan bakar.....	26
Gambar 4.3. Perubahan densitas atom U-235.....	27
Gambar 4.4. Nilai <i>conversion ratio</i> selama 150 tahun.....	28
Gambar 4.5. Nilai faktor multiplikasi efektif (k_{eff}) teras reaktor	30
Gambar 4.6. Daya ternormalisasi untuk distribusi daya radial pada fraksi volume <i>fuel</i> 60%	31
Gambar 4.7. Daya ternormalisasi untuk distribusi daya radial pada fraksi volume <i>fuel</i> 62,5%	32

Gambar 4.8. Daya ternormalisasi untuk distribusi daya radial pada fraksi volume <i>fuel</i> 65%	32
Gambar 4.9. Daya ternormalisasi untuk distribusi daya aksial pada fraksi volume <i>fuel</i> 60%	33

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Parameter desain teras reaktor	22
---	----

DAFTAR ISTILAH

<i>Burn-up</i>	: Energi yang dibebaskan selama pembakaran dalam reaktor (Megawatt <i>days</i> per ton (MWd/ton)).
<i>Cladding</i>	: Merupakan kelongsong yang berfungsi sebagai pelindung bahan bakar dan pemisah bahan bakar dengan pendingin.
<i>Conversion Ratio</i>	: Perbandingan antara jumlah atom fisil bahan bakar yang diproduksi dengan jumlah atom fisil yang dikonsumsi dalam reaktor.
Densitas Atom	: Populasi atom dalam setiap satuan volume (atom/cm ³).
Distribusi Daya	: Parameter yang digunakan untuk melihat pemerataan dari distribusi daya dalam satu teras reaktor.
<i>Excess Reactivity</i>	: Kelebihan reaktivitas.
Fertil	: Unsur atau atom yang tidak dapat langsung membelah setelah penangkapan neutron namun membentuk bahan fisil.
Fisil	: Unsur atau atom yang dapat membelah ketika menangkap neutron.
Fisi	: Reaksi pembelahan inti atom dengan partikel neutron menjadi inti atom lebih ringan disertai pelepasan energi.
Fusi	: Reaksi penggabungan inti atom yang ringan menjadi inti atom berat disertai pelepasan energi.
k_{eff}	: Konstanta untuk mengetahui tingkat populasi neutron di dalam teras dengan memperhatikan faktor kebocoran ke luar teras reaktor.
k_{inf}	: Konstanta untuk mengetahui tingkat populasi neutron di dalam satu sel bahan bakar tanpa adanya faktor kebocoran ke luar teras.
Penampang Lintang	: Probabilitas terjadinya suatu reaksi antara neutron dengan inti atom.
Reflektor	: Bahan pemantul neutron.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Demi terjaganya pembangunan yang berkelanjutan dan berbasis kebutuhan di segala bidang, dalam hal ini erat kaitannya dengan pemakaian energi. Sehingga, dengan tidak langsung kecukupan pasokan energi harus dijamin dan dilestarikan untuk generasi sekarang maupun mendatang. Dengan demikian, diperlukan pencarian energi alternatif yang mendukung pembangunan dan mempengaruhi kesejahteraan sosial maupun ekonomi dengan tetap menjaga stabilitas dan kelestarian lingkungan. Pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) merupakan salah satu sumber energi alternatif yang sedang dalam tahap pengembangan (Sulaiman, 2011).

Reaktor nuklir dapat menghasilkan energi nuklir dengan dampak pencemaran lingkungan yang lebih rendah dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga konvensional. Selain itu, reaktor nuklir juga memiliki tingkat keamanan yang tinggi dan lebih terjangkau atau ekonomis (Suhariyomo, 2006). Reaktor nuklir terjadi akibat reaksi fisi atau fusi nuklir secara berantai dan terkendali (Islami et al., 2019). Reaksi berantai fisi terjadi ketika inti elemen fisil membelah (*fissionable*) kemudian bereaksi dengan neutron termal dan menghasilkan elemen lain, energi panas, dan neutron-neutron baru. Reaktor nuklir memiliki bagian utama yaitu elemen bahan bakar, pelindung, moderator, dan elemen kontrol.

Energi nuklir telah mengalami fase perubahan dari generasi I,II,III hingga saat ini dan generasi IV untuk waktu mendatang (Ariani et al., 2010). *Gas Cooled Fast Reactor* (GFR) merupakan *fast reactor* generasi IV yang saat ini tengah dikembangkan. Adapun beberapa kelebihan reaktor generasi IV adalah siklus bahan bakar tertutup yang dapat meminimalkan hasil limbah serta pemakaian sumber daya alam, serta *inherent safety* atau sistem keselamatan yang berlapis. Aspek paling penting dalam merancang reaktor nuklir adalah perilaku neutron di dalam teras reaktor. Teras merupakan tempat pembakaran bahan bakar, serta tempat terjadinya

reaksi fisi. Teras terdiri dari ratusan susunan yang disebut assembly, di mana setiap assembly terdiri dari sekelompok sel bahan bakar (*fuel cell*) (Novalianda, 2019).

Dalam membangun reaktor nuklir diperlukan adanya proses simulasi agar dapat diperoleh hasil yang optimal serta sebagai acuan dalam aspek keselamatan nuklir. Diperlukan adanya analisis secara menyeluruh meliputi analisa neutronik, termal hidrolis, serta faktor keamanan. Perhitungan neutronik dibutuhkan untuk mendapatkan informasi terkait ketersediaan dan komposisi fisil yang diperlukan, serta untuk memahami siklus bahan bakar, distribusi neutron fluks, dan distribusi daya. Analisis neutron dilakukan dengan menggunakan persamaan difusi untuk menggambarkan bagaimana penyebaran neutron dan daya, serta faktor multiplikasi dalam reaktor. Reaktor nuklir menghasilkan energi dalam bentuk panas. Sehingga, reaktor memerlukan pendingin dengan karakteristik dapat menyerap panas, memiliki daya serapan neutron yang rendah, serta stabil terhadap radiasi dan temperatur yang tinggi (Riska et al., 2016). Penelitian ini berkaitan dengan analisis neutronik pada reaktor cepat dengan pendingin gas (GFR) karbondioksida superkritis (S-CO₂) bahan bakar yang digunakan adalah uranium metalik alam (U-10%wt Zr) dengan strategi *burnup modified* CANDU, menggunakan kode program SRAC.

1.2. Rumusan Masalah

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis neutronik pada tingkat kekritisan reaktor *gas cooled fast reactor* (GFR) dengan mengoptimasi daya termal dan ukuran teras menggunakan bahan bakar nuklir uranium metalik alam (U-10%wt Zr). Optimasi bertujuan untuk mencapai kondisi operasi yang seimbang, terkendali, dan dapat dioperasikan dalam jangka waktu yang lama.

1.3. Batasan Masalah

Penelitian ini hanya mengkaji terkait analisis sel bahan bakar dan teras untuk tipe reaktor *Gas cooled fast reactor* (GFR); menggunakan pendingin gas karbondioksida superkritis (S-CO₂) dan bahan bakar uranium metalik alam (U-10%wt Zr). Analisis dilakukan dengan menggunakan perhitungan dari

persamaan difusi multigrup dan *burnup* yang disimulasikan dengan program SRAC.

1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan perhitungan tingkat sel bahan bakar dan teras untuk mendapatkan nilai level *burnup* dan faktor multiplikasi (k_{eff}).
2. Melakukan optimasi daya termal dan ukuran geometri teras GFR untuk mempertahankan tingkat kekritisan dari reaktor.
3. Menganalisis dampak pengoptimalan daya termal dan ukuran geometri teras terhadap tingkat kekritisan reaktor dan masa operasinya.

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam merancang *gas cooled fast reactor* (GFR) agar dapat diterapkan dalam Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di masa mendatang dalam rangka mendukung pengembangan energi yang efisien dengan tingkat keselamatan yang tinggi. Selain itu, penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat dalam menambah wawasan penulis maupun pembaca terkait simulasi perancangan teras pada reaktor cepat berpendingin gas (GFR) menggunakan kode program SRAC versi 4.0 (JENDL 4.0).

DAFTAR PUSTAKA

- Amriani, Y. A., & Tuahatu, J. W. (2021). Jurnal Penelitian Sains. *Jurnal Penelitian Sains*, 21(3), 163–167.
- Ariani, M., Shafii, M. A., Abdullah, A. G., & Su 'ud, Z. (2010). Studi Awal Desain Reaktor Cepat Berpendingin Gas Berbasis Bahan Bakar Uranium Alam. *Proceeding Seminar Dan Workshop Nasional Pendidikan Teknik Elektro (SWNE)*, 93–98.
- Ariani, M., Su 'ud, Z., & Manado, F. (2013). *Desain Reaktor Cepat Berpendingin Gas 600 MWth dengan Uranium Alam sebagai Input Siklus Bahan Bakar Design of Gas-Cooled Fast Reactor 600MWth with Natural Uranium As Fuel Circle Input*. 14(1), 11–15. <http://jurnal.unej.ac.id/index.php/JID>
- Ariani, M., Supardi, Manado, F., & Su'ud, Z. (2015). Potensi Torium Sebagai Bahan Bakar pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas untuk PLTN. *Prosiding Semirata 2015 Bidang MIPA BKS-PTN Barat*, 39–45.
- Arindya, R. (2017). Studi Keselamatan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir. *Seminar Nasional Energi & Teknologi (SINERGI) 2017*, 1, 17–23.
- Darmawati, R., Ariani, M., & Manado, F. (2020). Desain Konseptual Teras Reaktor Cepat Berumur Panjang Berpendingin S-CO₂ dengan Bahan Bakar Uranium Metalik Alam. *Jurnal Fisika Unand*, 9(3), 401–407. <https://doi.org/10.25077/jfu.9.3.401-407.2020>
- Duderstadt, J. J. (1976). Nuclear Reactor Analysis. In *Nuclear Science and Engineering* (Vol. 62, Issue 2, pp. 347–347). <https://doi.org/10.13182/nse77-a26972>
- Dwiatmanto, L. J. (2016). Penantian pembangunan pembangkit listrik tenaga nuklir di indonesia. *Orbith*, 12(2), 59–66.
- Fitriani, D. (2014). ANALISIS NEUTRONIK PADA REAKTOR CEPAT DENGAN VARIASI BAHAN BAKAR (UN-PuN , UC-PuC DAN MOX).

Jurnal Fisika Unand, 3(1), 1–7.

Harjanto, N. T. (2018). Dampak Lingkungan Pusat Listrik Tenaga Fosil dan Prospek PLTN Sebagai Sumber Energi Listrik Nasional. *Jurnal BATAN*, 1, 39–50.

Heriyanto, M., & Alfarizy, G. (2015). *Reaktivitas Reaktor Nuklir Sebagai Fungsi Burnup dan Waktu Operasi Reaktor Mata Kuliah FI-3242 Manajemen Bahan Bakar Nuklir*. May, 4. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.32506.90560>

Irfan, M., Bura, R. O., & Wahyudi, D. (2020). Konsep Teknologi Reaktor Nuklir Sebagai Sistem Propulsi Kapal Perang Logistik Landing Platform Dock. *Teknologi Daya Gerak*, 3(1), 1–24. <http://jurnalprodi.idu.ac.id/index.php/TDK/article/view/533>

Irka, F. H., & Su'ud, Z. (2015). Analisis Burn Up pada Reaktor Cepat Berpendingin Gas Menggunakan Bahan Bakar Uranium Alam. *Jurnal Ilmu Fisika / Universitas Andalas*, 7(2), 78–86. <https://doi.org/10.25077/jif.7.2.78-86.2015>

Irka, F. H., Suud, Z., Irwanto, D., Khotimah, S. N., & Sekimoto, H. (2021). Neutronics performances of gas-cooled fast reactor for 300-600 MWt Output Power with Modified CANDLE burn-up scheme in radial direction. *Journal of Physics: Conference Series*, 2072(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2072/1/012013>

Islami, I. N., Tismawati, H., & Subkhi, M. N. (2019). Studi Distribusi Neutronik Fluks Pada Reaktor Nuklir Sederhana. *Wahana Fisika*, 4(1), 35. <https://doi.org/10.17509/wafi.v4i1.15565>

Maemunah, I. R., Yuningsih, N., & Irwanto, D. (2019). Studi Komparasi Reaksi Fisi dan Fusi pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Masa Depan. *Prosiding Seminar Nasional Fisika 5.0*, 0, 473–481.

Munita, L., Shafii, M. A., Irka, F. H., & Su'ud, Z. (2018). Analisis Kekritisitas Lead-Cooled Fast Reactor (LFR) Berdasarkan Variasi Bahan Bakar (U-Zr dan UN-PuN). *Jurnal Fisika Unand*, 7(1), 80–83. <https://doi.org/10.25077/jfu.7.1.80->

83.2018

- Novalianda, S. (2019). Cetak Sari Novalianda, Power Flattening. In *Journal of Electrical Technology* (Vol. 4, Issue 3).
- Novalianda, S., Ramadhan, A., & Su'ud, Z. (2020). Perhitungan Burnup Desain Reaktor GFR berbasis bahan bakar Uranium Nitride. *Jurnal Penelitian Sains*, 22(2), 50. <https://doi.org/10.56064/jps.v22i2.577>
- Okumura, K. (2007). SRAC2006 : A Comprehensive Neutronics Calculation Code System. *Japan, JAEA*, 248–253.
- Putri, M. A., Fitriyani, D., & Irka, F. H. (2018). Analisis Neutronik Pada Gas Cooled Fast Reactor dengan Variasi Strategi Shuffling Bahan Bakar Arah Radial. *Jurnal Fisika Unand*, 7(2), 166–171. <https://doi.org/10.25077/jfu.7.2.166-171.2018>
- Richardina, V., Budi, W. S., & Tjiptono, T. W. (2015). Studi Parameter Reaktor Berbahan Bakar UO₂ Dengan Moderator H₂O Dan Pendingin H₂O. *Berkala Fisika*, 18(3), 95–100.
- Riska, Fitriani, 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), 28–34.
- 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. <https://doi.org/10.25077/jfu.7.2.151-158.2018>
- Shafii, M. A. (2013). *Beberapa Metode Penyelesaian Persamaan Transport Neutron dalam Reaktor Nuklir Solution Methods of Neutron Transport Equation in Nuclear Reactors*. 14(2), 59–65.
- Su'ud, Z., Ilham, M., Widiawati, N., & Sekimoto, H. (2018). Modified CANDLE Burnup Calculation System, Its Evolution, and Future Development. *Journal of Physics: Conference Series*, 1090(1). <https://doi.org/10.1088/1742->

6596/1090/1/012006

- Suhariyomo, G. (2006). Perkembangan Tenaga Nuklir Di Dunia. *Buletin Alara*, 7(3), 241314.
- Sulaiman, F. (2011). Identifikasi Potensi, Dampak dan Pengendalian Lingkungan dalam Pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir. *Dedikasi*, 2(3), 27–54.
- Susanty, E., Ariani, M., Royani, I., Su'ud, Z., & Monado, F. (2020). Desain Konseptual Reaktor Cepat Berpendingin Karbondioksida dan Berbahan Bakar Uranium Alam Dengan Daya 2400 MW. *Jurnal Fisika Flux: Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat*, 17(2), 125. <https://doi.org/10.20527/flux.v1i1.7184>