

Desain Konseptual Teras Reaktor Cepat Berumur Panjang Berpendingin S-CO₂ dengan Bahan Bakar Uranium Metalik Alam

Rahma Darmawati, Menik Ariani, Fiber Monado*
Jurusan Fisika Fakultas MIPA Universitas Sriwijaya,
Kampus Pascasarjana Unsri, Jalan Padang Selasa, Palembang-30139

Info Artikel

Histori Artikel:

Diajukan: 9 Juni 2020
Direvisi: 5 Juli 2020
Diterima: 16 Juli 2020

Kata kunci:

modified Candle
reaktor cepat
S-CO₂
srac
uranium metalik

Keywords:

modified Candle
fast reactor
S-CO₂
srac
metallic uranium

Penulis Korespondensi:

Fiber Monado
Email: fibermonado@unsri.ac.id

ABSTRAK

Telah dibuat sebuah desain konsep teras reaktor cepat berpendingin S-CO₂ dengan bahan bakar uranium metalik alam yang dapat beroperasi dalam waktu yang lama (berumur panjang). Metode penyusunan bahan bakar dilakukan menggunakan strategi *burn-up modified CANDLE (Constant Axial shape of Neutron flux, nuclide densities and power shape During Life of Energy production)*. Strategi pembakaran CANDLE yang dimodifikasi dengan *region* pertama berada di dekat *region* terakhir telah diterapkan. Perhitungan teras reaktor dilakukan menggunakan modul CITATION pada sistem kode SRAC (*Standard Reactor Analysis Code*). Tahap awal penelitian dengan menghitung sel bahan bakar menggunakan modul PIJ sebagai *input* siklus telah dilakukan. Parameter perhitungan yang diamati adalah nilai faktor multiplikasi efektif (*k-eff*), distribusi daya arah aksial dan radial serta reaktivitas pada teras reaktor. Hasil perhitungan menunjukkan nilai *k-eff* dari awal siklus pembakaran sekitar 1,0490 hingga akhir siklus sebesar 1,0598. Distribusi daya arah aksial paling besar terjadi pada ketinggian teras 115 cm yaitu sebesar 1,9824 watt/cc. Sedangkan untuk distribusi daya arah radial paling besar terjadi di tengah teras yaitu sebesar 2,1697 watt/cc. Nilai reaktivitas rata-rata selama waktu operasi sebesar 0,0562. Berdasarkan hasil tersebut, keadaan teras reaktor memenuhi syarat untuk beroperasi.

The conceptual design of a fast reactor core has been made with S-CO₂ as a coolant and natural metallic uranium as a fuel, which can operate for a long time (long-life reactor). The fuel preparation method uses a strategy of burn-up modified CANDLE (Constant Axial shape of Neutron flux, nuclide density, and power shape During Life of Energy production). The modified CANDLE burning strategy with the first region near the last region has been implemented. The reactor core calculation is performed using the CITATION module on the SRAC (Standard Reactor Analysis Code) code system. The initial phase of research by counting fuel cells using the PIJ module as a cycle input has been carried out. The calculation parameters observed were effective multiplication factor (*k-eff*), axial and radial power distribution, and reactivity on the reactor core. The calculation results show the *k-eff* value from the burning of life (BOL) cycle around 1.0490 until the end of the cycle of 1.0598. The largest axial power distribution occurs at the reactor core height of 115 cm, equal to 1.9824 watts/cc, whereas the largest radial power distribution occurs in the center of the core, which is equal to 2.1697 watts/cc. The average reactivity value during the operation time of around 0.0562. Based on these results, the reactor core condition qualifies for operation.

Copyright © 2020 Author(s). All rights reserved

I. PENDAHULUAN

Pertambahan jumlah penduduk dan meningkatnya kehidupan masyarakat dari berbagai sektor ekonomi dan pendidikan menyebabkan kebutuhan akan energi listrik yang lebih besar. Laju pertumbuhan ekonomi dan perkembangan sektor industri juga berpengaruh terhadap intensitas penggunaan energi listrik. Kebutuhan tersebut akan sulit terpenuhi apabila hanya mengandalkan sumber energi konvensional yang semakin terbatas. Dengan jumlah penduduk sekitar 269,6 juta jiwa, konsumsi listrik nasional di Indonesia pada bulan Januari 2020 sekitar 1.142 kWh/kapita (Kementerian ESDM, 2020).

Perkembangan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) setiap tahun semakin bertambah, tercatat hingga Juni 2018 sudah ada 451 unit PLTN yang beroperasi di seluruh dunia yang tersebar di 30 negara dan 58 reaktor lainnya sedang dibangun, sebagian besar di Asia. PLTN saat ini menyediakan sekitar 11% dari listrik dunia, dengan 12 negara menggunakan tenaga nuklir untuk setidaknya 30% dari pembangkit listrik nasional mereka. Kapasitas nuklir global sekarang adalah yang tertinggi yang pernah ada yaitu sebesar 394 gigawatt listrik (IAEA, 2018).

Saat ini, perkembangan reaktor nuklir sudah sampai pada generasi ke-IV dengan beberapa desain yang direkomendasikan. Reaktor generasi ini merupakan pengembangan reaktor-reaktor generasi sebelumnya, sehingga memiliki beberapa kelebihan, yaitu: meningkatkan keselamatan nuklir, meningkatkan resistensi proferasi nuklir, meminimalkan limbah nuklir dan penggunaan sumber daya alam serta mengurangi biaya pembangunan maupun pengoperasian reaktor (GIF, 2014). Salah satu reaktor nuklir generasi ke-IV yaitu GFR (*Gas-cooled Fast Reactor*) yang sedang dalam tahap pengembangan dan baru akan dikomersialkan setelah tahun 2030 (Monado, 2013). GFR beroperasi pada suhu yang tinggi, yaitu sekitar 850° C.

Penelitian mengenai reaktor GFR telah sering dilakukan seperti penelitian mengenai perhitungan sel bahan bakar uranium metalik alam (U-10%wtZr) tanpa pengayaan (*enrichment*) dan pengayaan (1-10)% dengan pendingin berupa karbondioksida (CO₂) (Susanty, 2019). Perhitungan sel bahan bakar tersebut menggunakan persamaan *transport* neutron pada modul PIJ SRAC sehingga didapatkan nilai faktor multiplikasi tak hingga ($K_{inf} = 1,03$) dan dapat digunakan sebagai *input* perhitungan teras reaktor. SRAC merupakan sebuah sistem kode yang terpadu untuk analisis perhitungan neutronik pada beberapa jenis reaktor cepat dan termal. SRAC terdiri dari lima kode *modulus* yang sudah terintegrasi, yaitu PIJ, ANISN, TWOTRAN, TUD dan CITATION (Okumura, 2007). Desain konsep GFR juga digunakan pada penelitian Aulia (2016) yang menggunakan bahan bakar berupa thorium nitride (ThN) dan berpendingin helium. Pada penelitian tersebut didapatkan kondisi teras reaktor dalam keadaan kritis pada bahan bakar thorium nitride dengan pengayaan uranium-233 sebesar 5% dan nilai reaktivitas sebesar 0,002% Δ k/k. Selain menggunakan bahan pendingin karbondioksida dan helium, GFR dapat juga menggunakan bahan gas pendingin lain seperti karbondioksida superkritis (S-CO₂) (Parma, 2011). Faula (2019) juga melakukan penelitian menggunakan konsep GFR berpendingin CO₂ dengan bahan bakar uranium metalik alam dengan waktu *refueling* setelah teras beroperasi selama 10 tahun. Pada penelitian tersebut, daya termal yang digunakan sebesar 500 MWt, dengan ukuran tinggi teras 180 cm dan jejarnya 110 cm. Hasil yang didapatkan, nilai k-eff yang didapatkan pada 2 tahun pertama operasi teras sebesar 1,013 dan di akhir siklus operasi (tahun ke-10) nilai k-eff mencapai 1,028.

Gas CO₂ adalah salah satu gas yang paling banyak dimanfaatkan pada kondisi superkritisnya. Konsep reaktor menggunakan S-CO₂ sebagai pendinginnya memiliki beberapa potensi keuntungan signifikan dibandingkan sistem pendingin helium dan logam cair. Karbondioksida memiliki kapasitas panas dan koefisien panas yang lebih tinggi jika dibandingkan helium, dengan titik kritiknya yang relatif rendah ($T_c = 31,3$ °C dan $P_c = 72,9$ atm) (Riska, 2016). Zat ini bersifat ramah lingkungan dan tidak berbahaya bagi kesehatan manusia serta tidak mudah terbakar sehingga lebih aman digunakan.

Bahan bakar metalik telah dikembangkan oleh *Lightbridge Corporation*, bekerjasama dengan *Framatome* Prancis. Pada reaktor cepat biasanya digunakan uranium dalam bentuk *alloy* uranium-zirkonium menggunakan zirkonium sebesar 10% (U-10%wt Zr). Uranium jenis ini digunakan untuk mencegah potensi kerusakan yang berakibat pada mahalnya biaya perawatan, sekaligus meningkatkan performa dan keselamatan reaktor nuklir (WNA, 2017).

Strategi *burn-up* CANDLE (*Constant Axial shape of Neutron flux, nuclide densities and power shape During Life of Energy production*) adalah sebuah konsep reaktor nuklir yang proses pembakaran bahan bakarnya dapat dianalogikan dengan terbakarnya lilin (Sekimoto, 2001; 2010). Sedangkan strategi *burn-up* CANDLE yang dimodifikasi dilakukan dengan cara membagi teras aktif (dalam arah aksial) menjadi sejumlah bagian (*region*) yang masing-masing berisi bahan bakar dengan komposisi tertentu (Su'ud, 2018).

Sebagai inovasi baru dari penelitian sebelumnya, penelitian ini menggunakan karbondioksida superkritis (S-CO₂) sebagai pendingin teras GFR yang diharapkan dapat membuat teras reaktor dapat beroperasi dengan baik.

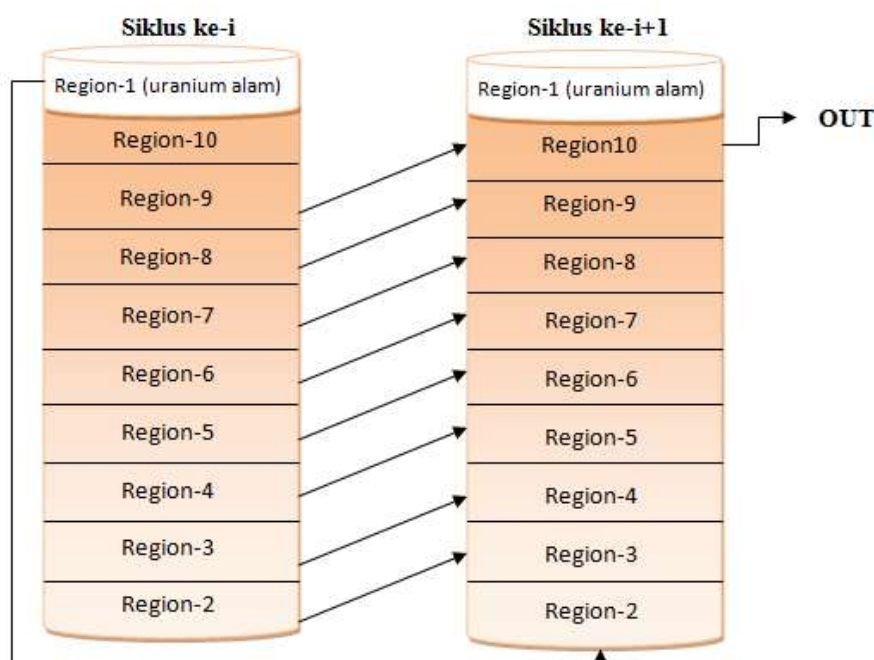
II. METODE

Perhitungan teras reaktor dilakukan menggunakan modul CITATION pada kode SRAC yang dikembangkan oleh JAEA (*Japan Atomic Energy Agency*) dengan data nuklida JENDL-4.0 (Okumura, 2007). Parameter desain teras reaktor disajikan pada Tabel 1 berikut:

Tabel 1 Spesifikasi parameter desain teras reaktor

Parameter	Deskripsi
Daya termal (MWt)	350 MWt
<i>Burnup</i> bahan bakar	100 tahun
Siklus <i>refueling</i>	10 tahun
Geometri teras	Silinder (R-Z)
Material <i>fuel pellet</i>	Uranium metalik (U-10%wtZr)
<i>Smear density</i>	85% TD
Material <i>cladding</i>	<i>Stainless steel</i> 316 (SS316)
Tekanan operasi teras	8 Mpa
Material <i>coolant</i>	Karbondioksida superkritis (S-CO ₂)
Fraksi volume: (<i>Fuel ; cladding ; coolant</i>)	65% ; 10% ; 25%
Diameter <i>pitch</i> (cm)	1,4
Diameter teras aktif (cm)	200
Tinggi teras aktif (cm)	150
Lebar reflektor (cm)	50

Penerapan strategi penyusunan bahan bakar *burn-up modified* CANDLE ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Skema strategi burnup modified candle (Su'ud, 2013)

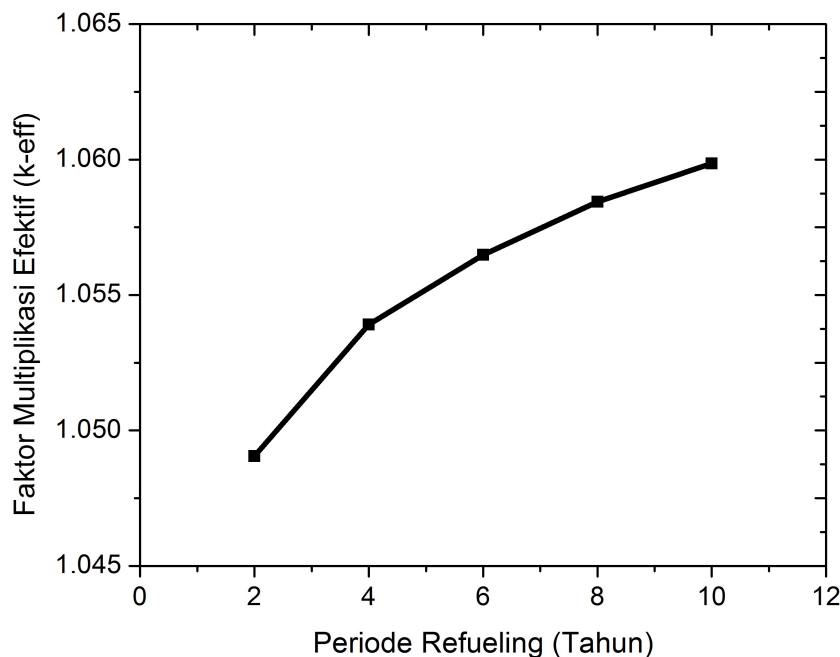
Algoritma Program SRAC

- Step 1 : Mulai
- Step 2 : *Input file* makroskopik *cross section* dari *output* modul PIJ
- Step 3 : *Input* tinggi dan jejari teras reaktor pada modul CITATION
- Step 4 : Hitung persamaan difusi multigrup
- Step 5 : Tampilkan *output* CITATION, apakah nilai k-eff sudah konvergen?
- Step 6 : Jika “ya” maka lanjut ke step berikutnya, jika “Tidak” maka kembali ke step 2
- Step 7 : Selesai.

III. HASIL DAN DISKUSI

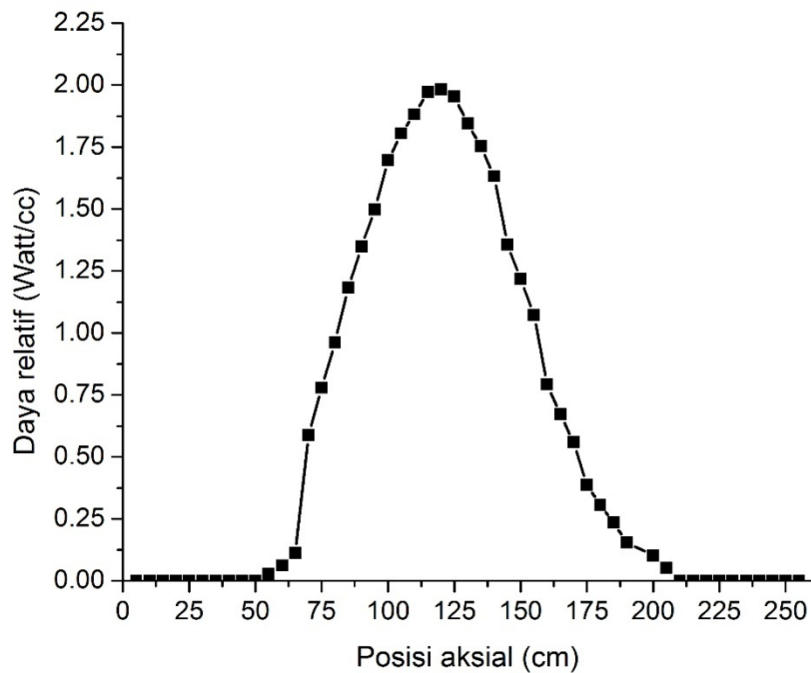
Dalam penelitian ini, dilakukan perhitungan untuk teras reaktor dengan parameter desain seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan skema susunan bahan bakar di teras seperti ditampilkan pada Gambar 1. Adapun parameter hasil survei perhitungan adalah nilai faktor multiplikasi efektif (k-eff), distribusi daya arah aksial dan radial serta reaktivitas pada teras reaktor.

Gambar 2 menunjukkan perubahan faktor multiplikasi efektif neutron (k-eff) selama pembakaran untuk satu siklus operasi selama 10 tahun dari teras reaktor yang dirancang. Nilai k-eff yang diperoleh pada awal siklus adalah sekitar 1,0490 (kondisi kritis) dengan eksese reaktivitas sebesar 0,0468 setelah itu meningkat secara monoton hingga akhir siklus (k-eff = 1,0598). Nilai k-eff yang diperoleh diawal operasi ini mempunyai margin yang lebih besar jika dibandingkan dengan nilai k-eff (k-eff = 1,01075) yang diperoleh oleh Monado (Monado, 2014) pada desain konsep GFR berpendingin helium. Nilai-nilai ini menandakan populasi neutron dari waktu ke waktu tetap terjaga dalam keadaan yang memenuhi syarat untuk sebuah teras reaktor nuklir dapat terus beroperasi.



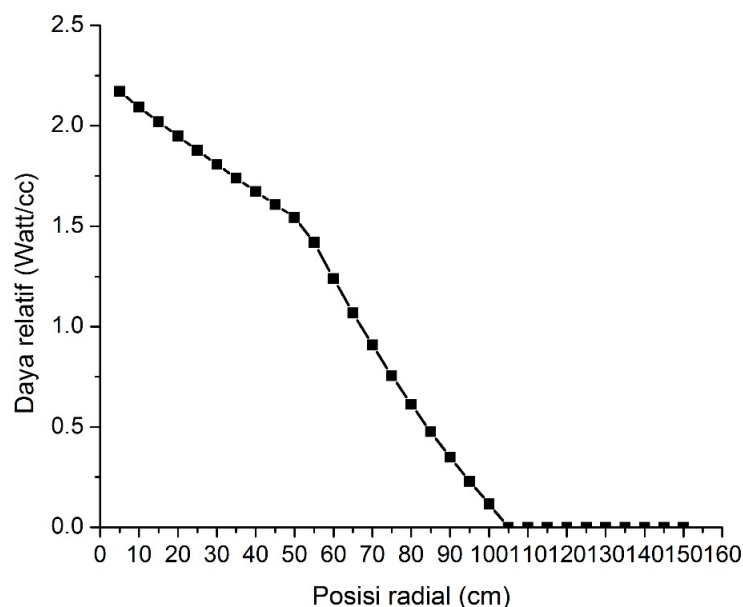
Gambar 2 Perubahan faktor multiplikasi efektif (k-eff) selama waktu operasi 10 tahun.

Gambar 3 menunjukkan distribusi aksial kerapatan daya relatif dan perubahannya selama 10 tahun pembakaran pada awal siklus hingga akhir siklus. Distribusi daya arah aksial menunjukkan persebaran daya yang terjadi secara vertikal. Nilai distribusi daya paling besar terdapat di tengah-tengah teras reaktor (*region 6*) atau pada ketinggian teras 115 cm yaitu sebesar 1,9824 watt/cc. Selanjutnya nilai distribusi daya terus mengalami penurunan seiring bertambahnya posisi aksial. Pada ketinggian awal dan akhir teras reaktor yaitu posisi aksial 5 cm hingga 50 cm dan posisi (210–255) cm bernilai 0 menandakan bahwa daerah tersebut merupakan reflektor aksial. Sedangkan posisi (55–205) cm adalah teras aktif. Posisi (55–70) cm terkait dengan *region 1*, posisi (75-90) cm terkait dengan *region 10*, posisi (95-110) cm terkait dengan *region 9* dan seterusnya.



Gambar 3 Perubahan distribusi daya arah aksial selama waktu operasi 10 tahun

Gambar 4 menunjukkan distribusi daya arah radial setengah teras reaktor, yaitu persebaran daya yang terjadi secara horizontal. Panas paling tinggi terjadi pada pusat teras reaktor yaitu sebesar 2,1697 watt/cc. Distribusi panas disekeliling daerah pusat reaktor mengalami penurunan secara perlahan hingga posisi radial 50 cm. Selanjutnya menurun lebih drastis hingga posisi 100 cm. Pada posisi 100 cm distribusi daya adalah 0,11 watt/cc (ujung teras aktif radial). Selanjutnya posisi 105 cm hingga ke tepi merupakan tebal reflektor arah radial yang bernilai nol. Hal ini disebabkan karena tidak ada sumber neutron pada area ini, jadi tidak ada energi panas yang dibangkitkan pada daerah reflektor.



Gambar 4 Distribusi daya arah radial setengah teras reaktor selama waktu operasi 10 tahun

Tabel 2 menunjukkan nilai reaktivitas teras reaktor yang menyatakan perubahan faktor multiplikasi efektif selama 10 tahun operasi pada awal siklus hingga akhir siklus. Ketika teras reaktor dalam keadaan kritis ($k\text{-eff} = 1$), maka nilai reaktivitas (ρ) akan bernilai 0 ($\rho = 0$), hal ini menunjukkan reaksi berantai yang independen terhadap waktu dan jumlah neutron pada suatu generasi sama dengan jumlah neutron pada generasi sebelumnya. Besarnya nilai perubahan reaktivitas ($\Delta\rho$) reaktor nuklir yang aman untuk digunakan selama operasi reaktor adalah maksimum 0,5% $\Delta k/k$ (Suparmi, 2019). Desain konsep teras yang dibuat ini menghasilkan rata-rata nilai reaktivitas selama 10 tahun operasi sebesar 0,0562, dengan nilai perubahan reaktivitas dalam rentang (0,13-0,44)% $\Delta k/k$. Nilai-nilai sebesar ini mengimplikasikan reaktor masih aman beroperasi.

Tabel 2 Nilai reaktivitas (ρ) teras reaktor

Periode <i>Refueling</i> (Tahun)	Nilai $k\text{-eff}$	Reaktivitas (ρ)
2	1,049058	0,0468
4	1,053909	0,0512
6	1,056478	0,0535
8	1,058442	0,0552
10	1,059858	0,0565

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan pengujian dan analisa yang telah dilakukan, maka didapatkan kesimpulan bahwa studi desain konseptual GFR 350 MWt berumur panjang berpendingin S-CO₂ dengan uranium alam (U-10%wt Zr) sebagai input siklus bahan bakar telah berhasil dilakukan. Didapatkan nilai teras reaktor dalam kondisi aman dan stabil yaitu nilai $k\text{-eff}$ pada awal siklus pembakaran sebesar 1,0490 dengan nilai reaktivitas 0,0468 hingga akhir siklus pembakaran nilai $k\text{-eff} = 1,0598$ dengan nilai reaktivitas 0,0565. Distribusi daya arah aksial dan radial paling besar yaitu 1,9824 watt/cc dan 2,1697 watt/cc. Hal ini menunjukkan bahwa desain reaktor ini dapat beroperasi selama 10 tahun tanpa pengisian bahan bakar dan hanya perlu uranium alam sebagai input siklus bahan bakar.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada pimpinan Universitas Sriwijaya yang telah memfasilitasi penelitian ini melalui skema penelitian Unggulan Kompetitif tahun 2019-2020.

DAFTAR PUSTAKA

- Aulia, S, "Studi Desain Konseptual Gas-cooled Fast Reactor (GFR) Berpendingin Helium Berbasis Bahan Bakar Thorium Nitride (ThN)", Tesis S2, Universitas Sriwijaya, 2016.
- E. J. Parma, Steven A. W., Milton, E. V., Darryn D. F., Gary E.R., Ahti J. S., Ahmad A. R. dan Pavel V. T., 2011, *Supercritical CO₂ Direct Cycle Gas Fast Reactor (SC-GFR) Concept*, SANDIA REPORT, California.
- Faula, U, "Desain Konseptual Reaktor Tipe GFR Menggunakan Strategi *Brun-up Modified* CANDLE Berbasis Bahan Bakar Uranium Metal dan Pendingin CO₂", Skripsi S1, Universitas Sriwijaya, 2019.
- Generation IV International Forum., Technology Roadmap Update for Generation IV Nuclear Energy Systems*, 1-66 (2014).
- H. Sekimoto, Ryu, K. dan Yoshimura, Y., 2001, *CANDLE: The New Burnup Strategy*, Nuclear Science Engineering, Tokyo.
- H. Sekimoto, 2010, *Light a CANDLE an Innovative Burnup Strategy of Nuclear Reactors Second Edition*, CRINES, Tokyo.
- International Atomic Energy Agency., Director General's Statement at World Nuclear Exhibition*, Vienna, 2018.

- K. Okumura, Teruhiko K., Kunio K. dan Keichiro T., 2007, *SRAC2006: A Comprehensive Neutronics Calculation Code System*, Division of Nuclear Data and Reactor Engineering Nuclear Science and Engineering Directorate Japan Atomic Energy Agency, Tokyo.
- Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia., Konsumsi Listrik Nasional, Jakarta, 2020.
- Monado, F., Zaki S., Abdul W., Khairul B., Menik A. dan Hiroshi S. 2013, 'Application of Modified CANDLE Burn-up to Very Small Long Life Gas-cooled Fast Reactor', *Advanced Materials Research*, Vol. 772, pp 501-506.
- Monado, F., Zaki S., Abdul W., Khairul B., Menik A. dan Hiroshi S. 2014, 'Power flattening on modified CANDLE small long life gas-cooled fast reactor', *AIP Conference Proceedings 1615*, 47, Fakultas MIPA Unsri, Palembang.
- Riska, Dian F. dan Feriska H. I. 2016, 'Analisis Neutronik pada *Gas Cooled Fast Reactor* (GCFR) dengan Variasi Bahan Pendingin (He, CO₂, N₂)', *Jurnal Fisika Unand* Vol. 5, No. 1.
- Suparmi, A., Tuti D. S., Suharyana, Fuad A. dan Riyatun 2019, 'Perhitungan Perubahan Reaktivitas pada Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy Akibat Pengoperasian Power Ramp Test Facility', *Prosiding SNFA (Seminar Nasional Fisika dan Aplikasinya)*, Program Studi Fisika Fakultas MIPA Universitas Sebelas Maret, Surakarta.
- Susanty, E., Menik A., Zaki S. dan Fiber M. 2019, 'Calculation of Burnup Fuel Cell Uranium Metalic with Carbon dioxide Cooled', *Journal of Physics: Conf. Ser.*1282 012028.
- Su'ud, Z dan Sekimoto, H. 2013, 'The prospect of Gas-cooled Fast Reactors for Long Life Reactors with Natural Uranium as Fuel Cycle Input', *Annals of Nuclear Energy*, 54, pp.58-66..
- Su'ud, Z., Muhammad I., Nina W. dan Hiroshi, S. 2018, 'Modified CANDLE Burnup Calculation System, its Evolution and Future Development', *Journal of Physics: Conference Series. World Nuclear Association., World Nuclear Performance June 2017*, London, 2017.