



## Desain neutronik reaktor cepat berpendingin Helium 900 MWth dengan skema *burnup* radial MCANDLE berbasis bahan bakar Thorium Mix Oxide (Th, Pu)O<sub>2</sub>

DAMRI, MENIK ARIANI\*, FIBER MONADO, DAN AKMAL JOHAN

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Sriwijaya, Sumatera Selatan 30862, Indonesia

<p><b>Kata kunci:</b> reaktor nuklir, SRAC, Thorium, Plutonium</p>	<p><b>ABSTRAK:</b> Desain Neutronik Reaktor Cepat Berpendingin Helium 900 MWth bahan bakar Thorium Mix Oxide telah dilakukan. Dibutuhkan penambahan bahan bakar fisil Pu<sup>239</sup> karena thorium alam tidak memiliki isotop fisil. Perhitungan dilakukan menggunakan simulasi komputasi dengan program SRAC. Reaktor ini menggunakan Skema <i>Burnup</i> MCANDLE arah Radial dengan membagi teras reaktor menjadi 10 bagian. Setelah 10 tahun periode burn up, bahan bakar di <i>shuffling</i> secara radial dari bagian 1 ke bagian 2, bagian 2 ke bagian 3, begitu seterusnya sampai bahan bakar di bagian 9 di-<i>shuffling</i> ke bagian 10 sehingga bahan bakar bagian 10 dikeluarkan dari teras reaktor dan bahan bakar baru ditempatkan di bagian 1. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa komposisi bahan bakar 86% Th dan 14% Pu<sup>239</sup> dalam keadaan kritis sampai pada tahun ke 4 ditunjukkan dengan nilai <math>k_{eff}</math> 1,012 dengan reaktivitas 0,0119.</p>
<p><b>Keywords:</b> nuclear reactor, SRAC, Thorium, Plutonium</p>	<p><b>ABSTRACT:</b> The Neutronic Design of a 900 MWth Helium Cooled Fast Reactor fueled by Thorium Mix Oxide has been carried out. The addition of fissile fuel Pu<sup>239</sup> is needed because natural thorium has no fissile isotopes. Calculations are performed using computational simulations with the SRAC program. This reactor uses the Radial direction MCANDLE Burnup Scheme by dividing the reactor core into 10 parts. After a 10 year burn-up period, the fuel is shuffled radially from section 1 to section 2, section 2 to section 3, and so on until the fuel in section 9 is shuffled to section 10 so that section 10's fuel is removed from the reactor core and new fuel is placed in section 1. The calculation results show that the fuel composition of 86% Th and 14% Pu<sup>239</sup> is in a critical state until the 4th year is indicated by a <math>k_{eff}</math> value of 1.012 with a reactivity of 0.0119.</p>

### 1 PENDAHULUAN

Ketersediaan bahan bakar fosil sebagai sumber energi semakin berkurang karena penggunaan energi terus meningkat seiring dengan kemajuan teknologi dan pesatnya pertumbuhan penduduk. Energi nuklir adalah alternatif sumber energi lain yang memadai untuk pemenuhan kebutuhan ketersediaan energi tersebut. Energi nuklir dibangkitkan oleh reaksi pembelahan/fisi yang terjadi di dalam teras reaktor suatu Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN).

Fisi nuklir adalah proses pembelahan atom berat menyebabkan terbentuknya atom-atom yang lebih ringan, biasanya karena tumbukan neutron. Proses ini menimbulkan panas dan pelepasan neutron, dan pada keadaan tertentu pelepasan neutron yang ber-

lebih menyebabkan fisi berlanjut (reaksi berantai), dengan pelepasan energi yang sangat signifikan [6].

Penggunaan bahan bakar nuklir banyak didasarkan pada bahan bakar *fisille* yaitu Uranium-235 dan plutonium-239 sedangkan bahan bakar *fertille* seperti thorium ( $Th^{232}$ ) menjadi bahan bakar alternatif yang sedang dikembangkan. Sumber daya thorium di alam sekitar 3 kali lebih besar dari uranium dan dapat penggunaannya sebagai bahan bakar dapat mengurangi jumlah limbah radioaktif [8]. Selain itu penggunaan  $Th^{232}$  sebagai bahan bakar dikarenakan lebih aman, lebih murah, dan lebih ramah lingkungan.  $Th^{232}$  lebih aman karena tidak memiliki isotop yang bersifat fisil sehingga tidak cocok digunakan untuk senjata nuklir [1].

Menurut [2], Thorium-232 yang merupakan bahan bakar *fertille* dapat menjadi bahan bakar *fisille*

\* Corresponding Author: email: [menik\\_ariani@unsri.ac.id](mailto:menik_ariani@unsri.ac.id) No. HP: 081373101248

dengan memproduksi Uranium-233 melalui proses penangkapan neutron. Jika Thorium-232 menangkap neutron dengan energi rendah akan menghasilkan isotop  $U^{233}$ .

Penelitian sebelumnya membahas tentang peningkatan kinerja usia reactor GFR dengan Modified CANDLE arah Radial berpendingin  $Pb^{208}$  yang diperkaya [3]. Pada penelitian ini penulis membahas peningkatan kinerja reactor GFR arah radial dengan membagi teras reactor menjadi 6 region. Penelitian lain yang menerapkan strategi Modified CANDLE arah radial adalah Perhitungan Desain Konsep Reaktor Cepat berpendingin Karbondioksida Superkritik dan Berbahan Bakar Uranium Metalik Alam [7]. Pada penelitian ini penulis membagi teras reactor menjadi 10 region.

Pada penelitian ini akan dilakukan desain neutronik reactor cepat berpendingin helium 900 MWth dengan skema *burnup* radial MCANDLE berbahan bakar Thorium Mix Oxide dengan memanfaatkan nuklida plutonium-239 sebagai bahan fisil. Variasi penambahan plutonium-239 dengan thorium alam dilakukan agar didapat komposisi yang tepat dan teras reactor dapat beroperasi selama 10 tahun tanpa pengisian bahan bakar.

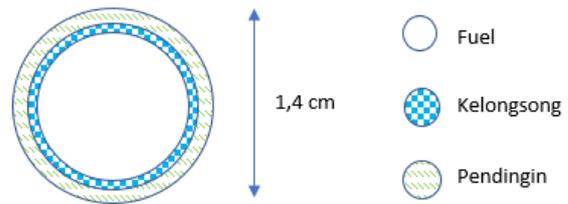
## 2 METODE PENELITIAN

Desain reactor yang digunakan pada penelitian ini adalah reactor cepat berpendingin gas (GFR). Spesifikasi GFR yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 1.

**Tabel 1** Parameter Desain GFR

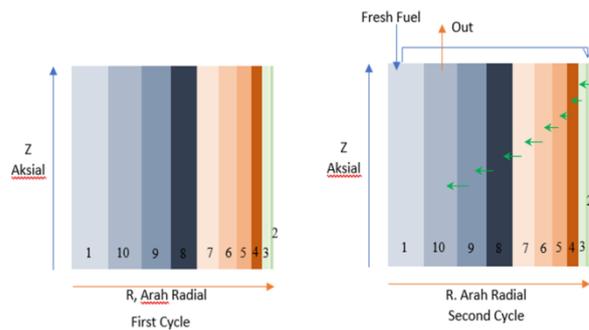
Parameter	Deskripsi
Daya termal (MWt)	900 MWt
Bahan Bakar	Thorium mixed oxyde ( $Th, Pu$ ) $O_2$
Siklus Pengisian bahan bakar	10 tahun
Bentuk teras	Silinder
Bahan Kelongsong	Stainless steel 316 (SS316)
Pendingin	Helium
Fraksi sel Bahan Bakar	65% ; 10% ; 25%
Ukuran teras aktif	200 cm x 300 cm

Fraksi volume bahan bakar adalah perbandingan volume bahan bakar terhadap volume keseluruhan pin bahan bakar yang meliputi bahan bakar, selongsong dan pendingin [9]. Fraksi volume bahan bakar pada penelitian ini yaitu 65% *fuel*, 10% selongsong dan 25% helium sebagai pendingin seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.

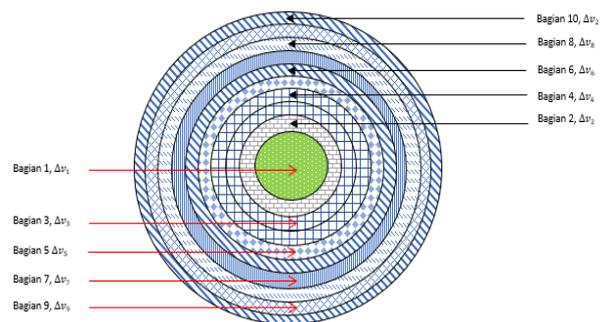


**Gambar 1** Geometri Sel Bahan Bakar.

Strategi *burnup* yang digunakan adalah MCANDLE (*Modified Constant Axial shape of Neutron flux, nuclide densities and power shape During Life of Energy producing reactor*). Teras reactor dibagi menjadi 10 bagian secara radial dengan volume yang sama seperti ditunjukkan pada gambar 4. Pada awal operasi, bagian 1 berisi bahan bakar *fresh fuel*, bagian 2 berisi bahan bakar dari bagian 1 setelah 10 tahun periode *burnup*, bagian 3 berisi bahan bakar dari bagian 2 setelah 10 tahun periode *burnup*, dst. Bahan bakar di-*shuffling* secara radial seperti ditunjukkan pada Gambar 2.



**Gambar 2** Skema Modified CANDLE Radial (Tampak Samping)



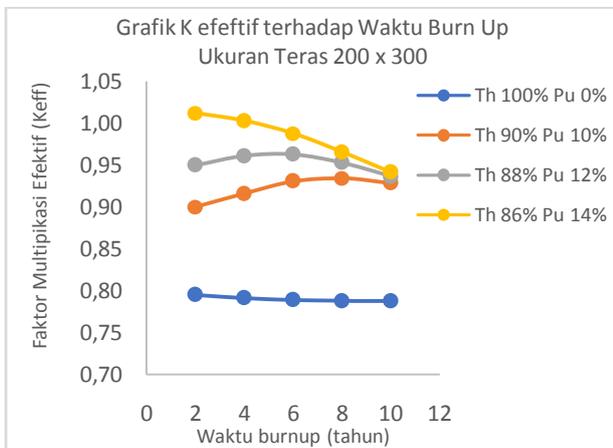
**Gambar 3** Skema Modified CANDLE Radial (Tampak Atas)

Parameter desain reactor pada penelitian ini meliputi faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ), Densitas Atom, dan Integral Conversion Ratio (CR).

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

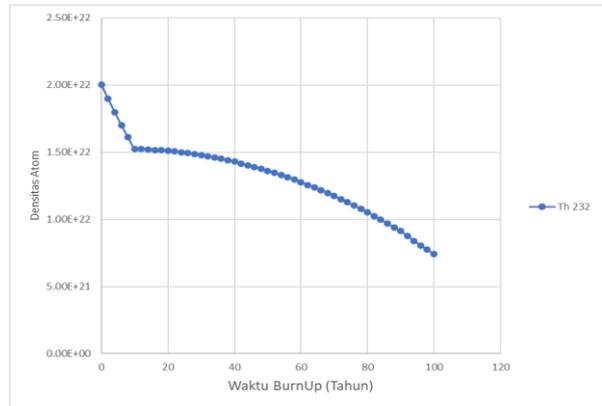
Desain teras reaktor dilakukan melalui simulasi komputasi menggunakan program SRAC yang dikembangkan oleh JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*). Standard Reactor Analysis Code (SRAC) merupakan sebuah sistem kode yang terpadu untuk analisis perhitungan neutronik pada beberapa jenis reaktor cepat dan termal [5].

Komposisi bahan bakar yang digunakan adalah thorium alam dan variasi persentase penambahan plutonium-239 sebagai pemicu terjadinya reaksi fisi pada reaktor nuklir. Perhitungan ini menghasilkan beberapa parameter survei neutronik selama waktu operasi 10 tahun yaitu faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ), Densitas Atom, dan Integral Conversion Ratio (CR).

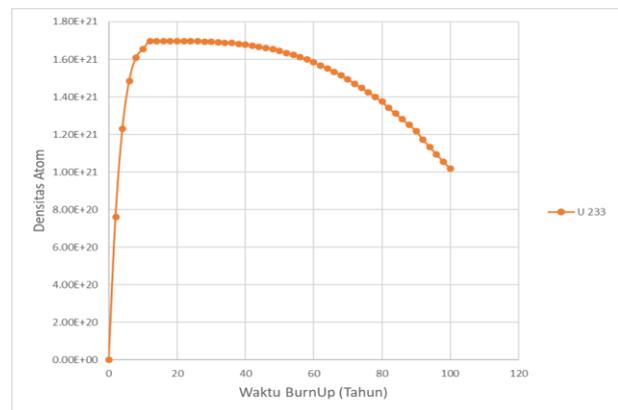


**Gambar 4** Perubahan faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ) selama waktu operasi 10 tahun.

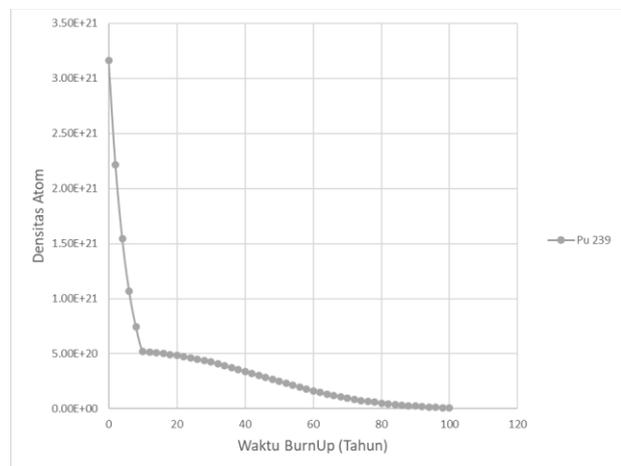
Gambar 4 menunjukkan nilai faktor multiplikasi efektif ( $k_{eff}$ ) selama waktu operasi 10 tahun. Bahan bakar thorium alam dicampur dengan plutonium sebagai pemicu reaksi fisi dengan perbandingan persentase tertentu yakni Th 100% Pu 0%, Th 90% Pu 10%, Th 88% Pu 12%, dan Th 86% Pu 14%. Dari gambar 3.1 persentase (Th 100% Pu 0%), (Th 90% Pu 10%), dan (Th 88% Pu 12%) memiliki besar nilai faktor multiplikasi  $k_{eff}$  masih kurang dari 1 ( $k_{eff} < 1$ ), reaktor belum kritis. Agar reaktor dalam kondisi kritis maka nilai multiplikasi efektif harus lebih dari atau sama dengan 1. Teras reaktor kritis dengan penambahan plutonium-239 sebesar 14% (Th<sup>232</sup> 86% Pu 14%) di dapat pada tahun ke 2 dengan nilai  $K_{eff}$  senilai 1.012011 dan tahun ke 4  $K_{eff}$  senilai 1.00275, namun pada tahun ke 6,8, dan 10 nilai  $K_{eff}$  berada dibawah 1 (teras pada kondisi sub kritis) sehingga reaktor dapat dikatakan dalam kondisi tidak kritis selama 10 tahun waktu *burnup*.



**Gambar 5** Perubahan Densitas Atom Th<sup>232</sup>



**Gambar 6** Perubahan Densitas Atom U<sup>233</sup>



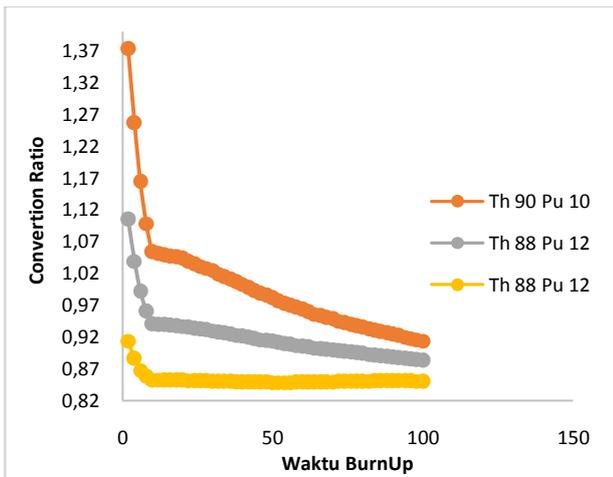
**Gambar 7** Perubahan Densitas Atom Pu<sup>239</sup>

Densitas atom merupakan populasi atom dalam tiap volume (atom/cm<sup>3</sup>). Perubahan densitas atom terjadi karena perubahan pada bahan fisil (dapat membelah) dan bahan fertil (tidak dapat membelah) dari setiap sel bahan bakar selama 100 tahun proses pembakaran.

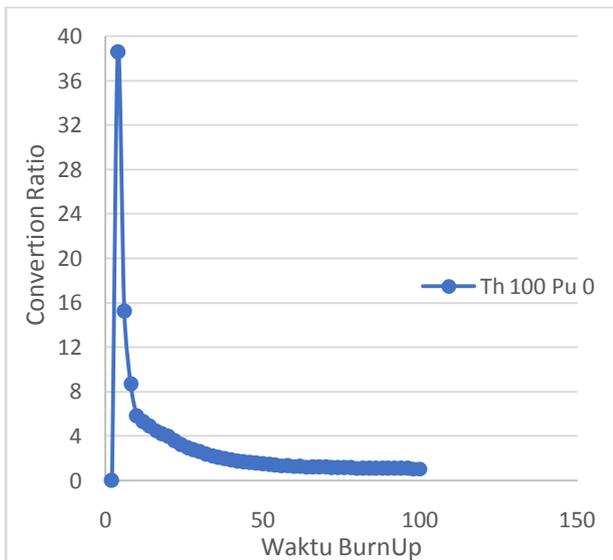
Dari Gambar 5 dan 7 menunjukkan bahwa selama proses pembakaran perubahan densitas atom Th<sup>232</sup> dan Pu<sup>239</sup> mengalami penurunan signifikan se-

lama periode 10 tahun pertama sedangkan pada tahun ke 20 sampai berakhir waktu *burnup* yaitu tahun ke 100 nilai densitas atom menurun landai. Penurunan ini terjadi dikarenakan kedua unsur tersebut mengalami reaksi fisi yang disertai dengan pelepasan energi dan reaksi penangkapan neutron.

Dari Gambar 6 menunjukkan perubahan densitas atom  $U^{233}$  mengalami peningkatan selama periode 10 tahun pertama waktu *burnup*, kemudian mengalami penurunan sampai akhir waktu *burnup*. Peningkatan densitas atom  $U^{233}$  ini menjadi sebab reaktor dapat kritis pada tahun ke 2 dan ke 4.



**Gambar 8** Nilai Conversion Ratio dalam waktu 100 Tahun



**Gambar 9** Nilai Conversion Ratio Th 100% Pu 0% dalam waktu 100 Tahun

Gambar 8 dan 9 menampilkan data rasio perbandingan atom yang diproduksi dengan atom yang di konsumsi cukup tinggi untuk Th 100% Pu 0% sebesar 38.578651 sampai di akhir waktu *burnup* sebesar 1.052629. Nilai ini menunjukkan jumlah atom fisil yang di produksi lebih banyak daripada atom fisil yang dikonsumsi pada 10 tahun pertama periode *burnup*. Penurunan nilai *conversion ratio* secara signifikan, disebabkan karena bagian 1 dalam teras reaktor berdekatan dengan bagian 10 (mengandung jumlah bahan bakar fisil lebih banyak) yang memiliki banyak bahan fisil yang telah terbakar selama 100 tahun, hal ini yang mencegah rasio atom fisil yang diproduksi dan dikonsumsi menjadi sama dengan 1.

Adapun untuk variasi Th 90% Pu 10% nilai CR sebesar 1.372412 dan diakhir waktu *burnup* sebesar 0.91381, Th 88% Pu 12% sebesar 1.105015 dan diakhir waktu *burnup* sebesar 0.882876. Th 86% Pu 14% sebesar 0.913856 dan diakhir waktu *burnup* sebesar 0.850433. Nilai ini menunjukkan pada akhir periode waktu *burnup* jumlah atom fisil yang di produksi lebih sedikit daripada jumlah atom fisil yang dikonsumsi. Keadaan teras reaktor yang demikian menuju subkritis, maka reaktor lama kelamaan akan kehabisan bahan bakar.

#### 4 KESIMPULAN

Telah dilakukan studi desain reaktor cepat berpendingin helium dengan skema *burnup* MCANDLE arah radial berbasis bahan bakar thorium mix oxide, menggunakan fraksi volume 65% *fuel*, 10% kelongsong dan 25% pendingin. Input bahan bakar thorium mixed oxide dengan persentase plutonium-239 sebesar 14% dapat menghasilkan keadaan reaktor yang kritis pada tahun ke 2 dengan nilai  $k_{eff} = 1,012011$  dan tahun ke-4 dengan nilai  $k_{eff} = 1.00275$ . Perubahan densitas atom  $Th^{232}$  dan  $Pu^{239}$  mengalami penurunan selama periode 10 tahun pertama sedangkan pada tahun terakhir waktu *burnup* yaitu tahun ke 100 nilai densitas atom  $Pu^{239}$  mengalami peningkatan sampai pada nilai  $1,38 \times 10^{18}$  atom/cm<sup>3</sup>. Perubahan densitas atom  $U^{233}$  mengalami peningkatan selama periode 10 tahun pertama sampai pada 40 tahun waktu *burnup*, kemudian mengalami penurunan sampai terakhir waktu *burnup* tahun ke 100. Reaktor tetap dapat mempertahankan kondisi kritis selama 4 tahun beroperasi tanpa pengisian ulang bahan bakar. Diperlukan modifikasi ukuran teras reaktor agar dapat beroperasi selama 10 tahun tanpa refueling atau pengisian bahan bakar.

**REFERENSI**

- [1] Kamei, T., & Hakami, S. (2011). Evaluation of implementation of thorium fuel cycle with LWR and MSR. *Progress in Nuclear Energy*, 53(7), 820–824. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2011.05.032>
- [2] Peel, R., van den Durlpel, L., Ogden, M. D., & Whittle, K. R. (2016). Three-component U-Pu-Th fuel for plutonium irradiation in heavy water reactors. *EPJ Nuclear Sciences & Technologies*, 2, 29. <https://doi.org/10.1051/epjn/2016022>
- [3] Widiawati, N., Su'ud, Z., Irwanto, D., Permana, S., Takaki, N., & Sekimoto, H. (2021). Enhancing the performance of a long-life modified CANDLE fast reactor by using an enriched 208Pb as coolant. *Nuclear Engineering and Technology*, 53(2), 423–429. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.07.008>
- [4] Anggoro, Y. D., Dewi, D., Yuliyanto, A. T., & Prapatan, M. (2013). Kajian Perkembangan PLTN Generasi IV. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 15, 69–79.
- [5] Okumura K, Teruhiko Kugo, Kunio Kaneko, & Keichiro Tsuchihashi. (2007). SRAC 2006: A Comprehensive Neutronics Calculation Code System. Division of Nuclear Data and Reactor Engineering Nuclear Science and Engineering Directorate (K Okumura, K Teruhiko, & K KuniaT Keichiro, Ed.; 2002 ed.). 2002
- [6] 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.
- [7] Vionita, V., Ariani, M., & Royani, I. (2022). Perhitungan Desain Konsep Reaktor Cepat Berpendingin Karbondioksida Superkritis dan Berbahan Bakar Uranium Metalik Alam. In *Jurnal Teori dan Aplikasi Fisika* (Vol. 10, Issue 02).
- [8] Ariani, M., Su'ud, Z., Waris, A., Khairurrijal, Monado, F., & Sekimoto, H. (2012). The feasibility study of small long-life gas cooled fast reactor with mixed Natural Uranium/Thorium as fuel cycle input. *AIP Conference Proceedings*, 1448(2012), 59–64. <https://doi.org/10.1063/1.4725438>
- [9] J. Duderstadt and L. Hamilton, *Nuclear Reactor Analysis*. Canada: John Wiley & Sons, Inc., 1976