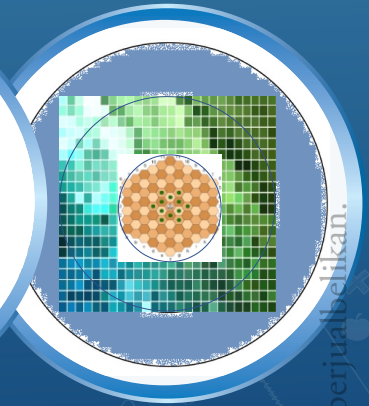
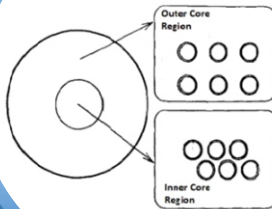
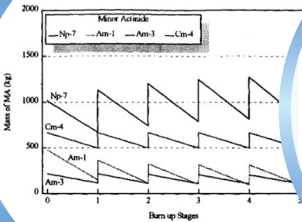


PEMANFAATAN PEMODELAN DAN SIMULASI BERBASIS KOMPUTASI DALAM PENGEMBANGAN REAKTOR NUKLIR

ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
BIDANG APLIKASI ENERGI NUKLIR



OLEH:
FERHAT AZIZ

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

**PEMANFAATAN PEMODELAN DAN
SIMULASI BERBASIS KOMPUTASI DALAM
PENGEMBANGAN REAKTOR NUKLIR**

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Diterbitkan pertama pada 2023 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution Non-commercial Share Alike 4.0 International license (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC-BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>



**PEMANFAATAN PEMODELAN DAN SIMULASI
BERBASIS KOMPUTASI DALAM
PENGEMBANGAN REAKTOR NUKLIR**

**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
BIDANG APLIKASI ENERGI NUKLIR**

OLEH:
FERHAT AZIZ

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2023 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Pemanfaatan Pemodelan dan Simulasi Berbasis Komputasi dalam Pengembangan Reaktor Nuklir/Ferhat Aziz--Jakarta: Penerbit BRIN, 2023.

v + 80 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-623-8372-08-9 (cetak)
978-623-8372-07-2 (e-book)




- | | |
|---------------------|---------------------------|
| 1. Reaktor nuklir | 2. Pemodelan dan simulasi |
| 3. Komputasi | 4. Fisika Reaktor |
| 5. Desain neutronik | |

621.483

Copy editor : Annisa' Eskahita Azizah
Proofreader : Noviasuti Putri Indrasari & Meita Safitri
Penata Isi : Rina Kamila
Desainer Sampul : Meita Safitri

Cetakan : September 2023



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B. J. Habibie, Lt. 8, Jl. M.H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: +62 811-1064-6770
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id
 PenerbitBRIN
 Penerbit_BRIN
 penerbit.brin

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR ISI

BIODATA RINGKAS	1
PRAKATA PENGUKUHAN	5
I. PENDAHULUAN.....	7
II. PEMODELAN DAN SIMULASI BERBASIS KOMPUTASI UNTUK PENGEMBANGAN REAKTOR NUKLIR.....	13
A. Metodologi Simulasi Berbasis Komputasi Reaktor Nuklir	14
B. Pemodelan dan Simulasi Berbasis Komputasi dalam Pengembangan Nuklir	18
III. PEMANFAATAN SIMULASI BERBASIS KOMPUTASI DALAM PENGEMBANGAN DESAIN REAKTOR PEMBAKAR LIMBAH NUKLIR.....	25
A. Komputasi Reaktor Pembakar Limbah Nuklir.....	28
B. Potensi Pemanfaatan Reaktor Pembakar Limbah Nuklir.....	31
IV. TANTANGAN DAN STRATEGI PEMANFAATAN SIMULASI BERBASIS KOMPUTASI DALAM PENGEMBANGAN REAKTOR NUKLIR	37
A. Tantangan Pemanfaatan Komputasi Desain Reaktor Masa Depan.....	37
B. Kolaborasi Riset sebagai Strategi Utama	40
V. KESIMPULAN	43
VI. PENUTUP	45
VII. UCAPAN TERIMA KASIH	47
DAFTAR PUSTAKA.....	51
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH.....	61
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	71

Buku ini tidak diperjualbelikan.

BIODATA RINGKAS



Ferhat Aziz lahir di Curup, Bengkulu, pada 10 November 1958 adalah anak kedelapan dari sebelas bersaudara, dari pasangan Bapak K.H. Abdul Aziz Masyhur dan Ibu Hj. Marhamah. Menikah dengan Dra. Diah Kusumawati dan dikaruniai empat orang anak, yaitu Nadia Ihsana, Firman Imaduddin, Farid Azzeddin, dan Fadli Azzeddin.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 3/M Tahun 2022, tanggal 19 Januari 2022 yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama di Badan Riset dan Inovasi Nasional terhitung mulai 1 Oktober 2021.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional Nomor 248/I/HK/2023 tanggal 14 Agustus 2023 tentang Majelis Pengukuhan Profesor Riset, yang bersangkutan dapat melakukan pidato pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Negeri No. 47 Palembang tahun 1970; Sekolah Menengah Pertama Xaverius III Palembang, tahun 1973; dan Sekolah Menengah Atas Xaverius I Palembang, tahun 1976. Memperoleh gelar sarjana fisika dari Universitas Indonesia tahun 1982; gelar Master of Science dari Department of Physics, Quaid-e-Azam University, Islamabad, Pakistan, tahun 1986; gelar Master of Science dari Department of Nuclear

Engineering, North Carolina State University, Raleigh, Amerika Serikat, tahun 1992; dan gelar Doctor of Engineering dalam bidang *nuclear engineering* dari Tokyo Institute of Technology, Tokyo, Jepang tahun 1996.

Mengikuti beberapa pelatihan yang terkait dengan bidang kompetensinya, antara lain Training on In-Core Fuel Management di Jakarta (1986); Evaluation of HTGCR Core Performance, JAERI, di Jepang (1999); Workshop on Status of High-Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGCR) Technology di Trieste, Italia (2003); dan International Atomic Energy Agency (IAEA) Training on Nuclear Power Planning and Public Acceptance di Slovenia dan Slovakia (2010).

Pernah menduduki jabatan struktural di Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) sebelum diintegrasikan ke dalam Badan Riset Inovasi Nasional (BRIN), yaitu sebagai Kepala Subbidang Optimasi dan Sistem Pengendalian, Pusat Pengembangan Informatika (Januari–September 1993); Kepala Bidang Teknologi Reaktor Maju, Pusat Pengembangan Sistem Reaktor Maju (1999–2006); Kepala Biro Kerja Sama, Hukum, dan Hubungan Masyarakat (2006–2012); Deputy Bidang Pendayagunaan Hasil Litbang dan Pemasarakatan Iptek Nuklir (2012–2013); Deputy Bidang Pengembangan Teknologi Daur Bahan Nuklir dan Rekayasa (2013–2014); dan Deputy Bidang Sains dan Aplikasi Teknologi Nuklir (2014–2016).

Jabatan fungsional peneliti diawali sebagai Peneliti Ahli Muda golongan III/d tahun 1999, Peneliti Ahli Madya golongan IV/b tahun 2003, Peneliti Ahli Madya golongan IV/c tahun

2005, dan memperoleh jabatan Peneliti Ahli Utama golongan IV/d dalam bidang kepakaran Aplikasi Energi Nuklir dan bidang penelitian Teknologi Reaktor Nuklir tahun 2018.

Menghasilkan 65 karya tulis ilmiah (KTI), baik yang ditulis sendiri maupun bersama penulis lain dalam bentuk buku, jurnal, dan prosiding. Sebanyak 32 KTI ditulis dalam bahasa Inggris dan 33 dalam bahasa Indonesia, termasuk yang disajikan dalam berbagai forum nasional maupun internasional.

Ikut serta dalam pembinaan kader ilmiah, yaitu sebagai pembimbing jabatan fungsional peneliti pada Pusat Riset dan Teknologi Bahan Maju Nuklir, Organisasi Riset Tenaga Nuklir (PRTBMN ORTN) BRIN; pembimbing skripsi (S-1) dan penguji disertasi S-3 di Institut Teknologi Bandung (ITB), Institut Pertanian Bogor (IPB), dan Universitas Gadjah Mada; serta sebagai pembimbing tesis dan pengajar di program Pascasarjana Ilmu Komputer di Universitas Pamulang.

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, yaitu sebagai pengurus dan anggota Himpunan Fisika Indonesia (HFI) (1982–sekarang), Himpunan Masyarakat Nuklir Indonesia (HIMNI) (2010–sekarang), anggota Perkumpulan Masyarakat Riset Material Indonesia atau Material Research Society-Indonesia (MRS-INA) (2016–sekarang), dan Perhimpunan Periset Indonesia (PPI) (2019–sekarang).

Terlibat aktif dalam berbagai kegiatan ilmiah nasional dan internasional, termasuk pernah menjadi anggota delegasi Indonesia pada IAEA General Conference, menjadi IAEA

Technical Cooperation Liaison Officer (TC-LO), *national representative* untuk Regional Cooperative Agreement for Research, Development and Training Related to Nuclear Science and Technology for Asia and the Pacific (RCA), serta sebagai *national coordinator* pada Forum on Nuclear Cooperation in Asia (FNCA).

Menerima tanda penghargaan Satyalancana Karya Satya X Tahun (1992), Satyalancana Karya Satya XX Tahun (2002), dan Satyalancana Karya Satya XXX Tahun (2012) dari Presiden RI.

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrahmaanirrahiim.

Assalaamu'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional yang mulia, dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama marilah kita panjatkan puji dan syukur kehadirat Allah Swt. atas segala rahmat, nikmat, dan karunia-Nya sehingga dalam kesempatan ini kita dapat berkumpul dan bersama-sama hadir pada acara orasi ilmiah pengukuhan Profesor Riset di Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN).

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya pada tanggal 12 September 2023 menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

“PEMANFAATAN PEMODELAN DAN
SIMULASI BERBASIS KOMPUTASI DALAM
PENGEMBANGAN REAKTOR NUKLIR”

Buku ini tidak diperjualbelikan.

I. PENDAHULUAN

Sebagai lembaga pemerintah yang menyelenggarakan teknis penelitian, pengembangan, pengkajian, dan penerapan di bidang ketenaganukliran, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) yang berubah menjadi Organisasi Riset Tenaga Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), telah melakukan berbagai kegiatan dengan mengutamakan keselamatan dan keamanan. Di antara kegiatan yang terus dilakukan adalah pengembangan di bidang teknologi reaktor nuklir dan bahan maju. Kegiatan ini sangat penting untuk mendukung pemanfaatan tenaga nuklir di bidang energi, seperti pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), yang tentunya sangat mendukung bidang non-energi, yaitu pertanian, kesehatan, industri, dan lain-lain (Aziz dkk., 2021; Aziz & Hasan, 2012; Soentono & Aziz, 2008). Upaya untuk menyebarluaskan pemanfaatan iptek nuklir juga terus dilakukan agar persepsi masyarakat terhadap aplikasi nuklir menjadi makin baik (Aziz, 1994a, 1994b, 1999a, 2000a, 2000b).

Penelitian dan pengembangan teknologi reaktor di Indonesia, khususnya dalam desain dan analisis reaktor nuklir, telah dilakukan praktis sejak reaktor penelitian TRIGA Mark II di Bandung diresmikan pada 1965 dan Kartini di Yogyakarta diresmikan pada 1979. Kegiatan tersebut mendapatkan momentum yang baik ketika Reaktor Serba Guna dan Laboratorium Pendukung (RSG-LP) dibangun dan beroperasi sejak akhir 1980-an di Serpong. Oleh karena itu, muncul ide untuk mengembangkan

pemanfaatan pemodelan dan simulasi berbasis komputasi (*computational modeling and simulation*) sebagai pendukung infrastruktur utamanya yang dapat dimanfaatkan oleh para peneliti (Subki, 1993).

Selama beberapa dekade terakhir, pemodelan dan simulasi berbasis komputasi telah diterima sebagai paradigma atau pilar penelitian ilmiah yang ketiga setelah teori dan eksperimen. Pemodelan dan simulasi berbasis komputasi telah menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari aktivitas penelitian dan pengembangan modern, termasuk dalam teknologi reaktor nuklir yang peneliti tekuni. Simulasi dapat memberikan wawasan tambahan yang sulit diperoleh dengan menggunakan analisis teoretis dan eksperimental saja. Penggunaan simulasi berbasis komputasi telah meningkatkan efisiensi penelitian ilmiah sehingga lebih cepat, murah, dan aman (Hernández dkk., 2018).

Tahap awal kegiatan simulasi berbasis komputasi di BATAN dilakukan untuk mendukung komputasi perencanaan energi, manajemen bahan bakar Reaktor Serba Guna (RSG) G.A. Siwabessy, perhitungan desain neutronik, dan keselamatan reaktor. Metode simulasi berbasis komputasi juga digunakan dalam penyiapan eksperimen kekritisan pertama RSG (Aziz & Jujuratisbela, 1987; Aziz & Santoso, 1993; Sudarsono dkk., 1988). Dalam perkembangannya, kegiatan pengembangan dengan komputasi dimanfaatkan untuk studi desain neutronik teras reaktor dengan metode deterministik difusi maupun probabilistik Monte Carlo serta pengembangan bahan maju, terlebih lagi dengan tersedianya sistem komputer personal (PC) dengan

kecepatan tinggi (Arkundato ddk., 2019; Harto dkk., 2003; Meriyanti dkk., 2010).

Dalam pengembangan iptek reaktor nuklir, penerapan simulasi berbasis komputasi dilakukan, antara lain untuk analisis kinerja fisika teras, desain neutronik reaktor eksperimental, dan desain reaktor maju secara umum. Analisis kinerja fisika teras RSG telah dilakukan melalui pengukuran eksperimental terhadap nilai reaktivitas lebih dan reaktivitas seluruh batang kendali, serta perhitungan menggunakan model teoretis. Pemanfaatan simulasi berbasis komputasi sangat cocok digunakan untuk mendapatkan solusi yang dibutuhkan dengan cara yang aman dan selamat. Hal ini akan membantu dalam pembuatan laporan analisis keselamatan (LAK) sebuah desain reaktor seperti RSG (Aziz & Jujuratisbela, 1987; PRSG BATAN, 2011; Jujuratisbela & Aziz, 1987a, 1987b).

Selain itu, simulasi berbasis komputasi dapat dimanfaatkan untuk studi optimalisasi parameter pada pengoperasian reaktor, dukungan untuk eksperimen, penelitian reaktor dengan bahan maju, desain dan pengembangan simulator untuk pelatihan operator reaktor, serta studi desain reaktor maju, seperti reaktor temperatur tinggi dan reaktor pembakar limbah nuklir (Aziz dkk., 1994, 2007; Mulyanto dkk., 1994b). Reaktor pembakar limbah nuklir perlu dan terus diantisipasi oleh negara yang menggunakan PLTN sebagai salah satu opsi dalam manajemen bahan bakarnya, baik menggunakan desain yang sudah ada maupun yang inovatif (Liu dkk., 2018).

Pentingnya PLTN dalam transisi energi bersih ditunjukkan oleh G20 ketika Direktur Jenderal IAEA, Rafael Mariano Grossi, dan para ahli bergabung dengan Indonesia selaku pemegang Presidensi G20 dalam membahas peran teknologi nuklir dalam mencapai tujuan emisi *net-zero* dan pembangunan berkelanjutan. Upaya ke arah ini ditunjukkan dengan disetujuinya pembentukan Majelis Tenaga Nuklir dan pembahasan Rancangan Undang-Undang Energi Baru dan Energi Terbarukan (RUU EBET) sebagai prioritas Indonesia tahun ini (Donovan & Watson, 2022; Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2022).

Tujuan penulisan naskah orasi ini adalah untuk menginformasikan bahwa pemanfaatan pemodelan dan simulasi berbasis komputasi dapat membantu para pelaku pengembangan iptek reaktor nuklir agar mendapatkan hasil kegiatannya dengan cepat, akurat, aman, dan selamat, khususnya dalam bidang yang terkait dengan studi desain neutronik teras reaktor, seperti reaktor pembakar limbah nuklir, yang menjadi benang merah dalam pengalaman komputasi penulis. Pemanfaatan simulasi berbasis komputasi secara umum diyakini akan menjadi makin dominan dalam pengembangan iptek nuklir, khususnya dalam pengembangan desain neutronik reaktor dan bahan struktur, sistem, dan komponen reaktor (Aziz, 2000c; Aziz dkk., 2018; Aziz & Kitamoto, 1996a).

Orasi ini ditulis dalam beberapa bab. Bab pertama merupakan pendahuluan. Bab II berisi uraian umum tentang metodologi dalam pemodelan dan simulasi berbasis komputasi untuk pengembangan desain reaktor nuklir. Selanjutnya, digambarkan secara singkat contoh hasil perhitungan menggunakan pemodelan dan simulasi berbasis komputasi untuk pengembangan desain reaktor nuklir dari tipe reaktor gas temperatur tinggi dan perhitungan desain perisai radiasi nuklir.

Pada Bab III diuraikan tentang pemanfaatan simulasi berbasis komputasi untuk pengembangan reaktor. Dalam bab ini didiskusikan bagaimana pemodelan dan simulasi berbasis komputasi dapat dimanfaatkan dalam pengembangan desain neutronik reaktor nuklir secara umum. Simulasi berbasis komputasi ini diharapkan dapat mendukung upaya penyiapan PLTN generasi maju yang mampu membakar limbahnya sendiri atau berasal dari PLTN lainnya sehingga dapat menjaga keberlanjutan pemanfaatan energi nuklir pada masa depan. Selanjutnya, pada Bab IV dijelaskan mengenai tantangan yang dihadapi dalam mengembangkan pemanfaatan pemodelan dan simulasi berbasis komputasi dan strategi yang diusulkan untuk mengatasi permasalahannya. Pembahasan dalam orasi ini diakhiri dengan Bab V sebagai kesimpulan dan Bab VI sebagai penutup.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

II. PEMODELAN DAN SIMULASI BERBASIS KOMPUTASI UNTUK PENGEMBANGAN REAKTOR NUKLIR

Pemodelan adalah proses untuk menghasilkan sebuah representasi dari konstruksi dan bekerjanya sistem yang diamati. Di sisi lain, model harus mudah dipahami. Model yang baik adalah pertukaran yang bijak antara realisme dan kesederhanaan. Model untuk simulasi umumnya merupakan model matematika yang dikembangkan dengan bantuan perangkat lunak simulasi (Maria, 1997).

Simulasi berbasis komputasi dianggap sebagai alat ilmiah yang menjadi pelopor dalam fisika nuklir pada periode setelah Perang Dunia II. Sejak itu, komputasi dan simulasi menjadi hal yang sangat diperlukan dalam banyak disiplin ilmu, seperti ilmu material, mekanika fluida, dan meteorologi. Kebutuhan untuk menggunakan komputer untuk desain reaktor nuklir meningkat sejak dimulainya era PLTN komersial pada 1960-an. Kemajuan yang pesat pada teknologi perangkat keras dan lunak komputer makin memperbesar potensi aplikasi komputer di semua aspek desain dan rekayasa, pengoperasian, dan pemeliharaan reaktor dengan memanfaatkan teknologi informasi dan sistem berbasis pengetahuan (International Atomic Energy Agency [IAEA], 1995; Winsberg, 2019).

Dalam pembangunan dan pengembangan desain PLTN, pengujian dan pemeriksaan diganti dengan metode simulasi ber-

basis komputasi yang lebih murah tanpa perlu merusak struktur itu sendiri untuk menentukan kekuatan dan kapasitasnya. Bagi peneliti nuklir, pemodelan dan simulasi berbasis komputasi ini sangat membantu dalam studi desain neutronik dan pengembangan bahan maju untuk struktur, sistem, dan komponen reaktor (Aziz dkk., in press; Aziz & Lasman, 2001; Aziz & Rivai, 2002; Panitra dkk., 2021).

Cabang komputasi yang berhubungan dengan arsitektur sistem dan perangkat lunak yang sesuai dan terkait dengan eksekusi instruksi dan aplikasi komputer secara simultan dikenal sebagai ilmu komputasi paralel. Aktivitas komputasi paralel dimulai pada akhir 1950-an, selanjutnya makin berkembang mengikuti pembangunan superkomputer sepanjang tahun 1960-an dan 1970-an. Dewasa ini, komputer kluster menjadi penggerak komputasi ilmiah dan merupakan arsitektur utama di pusat-pusat komputasi.

A. Metodologi Simulasi Berbasis Komputasi Reaktor Nuklir

Simulasi adalah eksekusi sebuah model. Sebuah model serupa, tetapi lebih sederhana daripada sistem yang diwakilinya. Sebuah model harus memiliki kemiripan yang mendekati sistem nyata dan memasukkan sebagian besar fitur utamanya. Eksekusi yang dilakukan dengan komputer disebut sebagai simulasi berbasis komputasi. Pendekatan dalam metode simulasi menganalisis model dengan cara yang berbeda dengan pendekatan analitis yang metode analisisnya murni bersifat teoretis. Jadi, simulasi

adalah alat untuk mengevaluasi kinerja suatu sistem pada berbagai konfigurasi.

Pemodelan dan simulasi berbasis komputasi memiliki peran penting dalam aplikasi energi nuklir, misalnya untuk menyimulasikan perilaku reaktor nuklir dan sistem lainnya. Simulasi memungkinkan peneliti menguji desain dan konfigurasi yang berbeda tanpa harus membuat prototipe yang mahal atau melakukan eksperimen berbahaya. Dalam rekayasa nuklir, pemodelan dan simulasi penting untuk menilai hasil yang diharapkan dari suatu percobaan sebelum percobaan sebenarnya dilakukan atau dalam mendesain suatu fasilitas nuklir, termasuk untuk perisai radiasi (Panitra dkk., 2021). Dengan kemajuan dalam teknik nuklir, ilmu komputer, perangkat keras komputasi berkinerja tinggi (*high-performance computing*), dan kemampuan visualisasi, para peneliti dapat memperoleh wawasan tentang suatu sistem fisik dengan cara yang tidak mungkin dilakukan dengan pendekatan tradisional.

Model matematika yang mewakili fisika reaktor nuklir terutama didasarkan pada dua bidang teoretis: teori transpor neutron dan teori difusi neutron, di mana pada dasarnya dapat dikatakan bahwa teori difusi neutron merupakan penyederhanaan dari teori transpor neutron. Metode numerik digunakan untuk menyelesaikan persamaan diferensial parsial yang mewakili fisika teras reaktor dan metode ini diturunkan dari teknik diskretisasi. Untuk memperoleh solusi numerik di bidang ilmiah apa pun, alat komputasi telah dikembangkan termasuk perangkat lunak dan perangkat keras. Pada masa lalu, pemrosesan komputer

sebelumnya adalah eksekusi berurutan perintah komputer, yang berarti bahwa tugas program dilakukan satu demi satu. Alat komputasi modern telah dikembangkan untuk pemrosesan paralel, menjalankan beberapa tugas secara bersamaan (Hernández dkk., 2018; Winsberg, 2019).

Teori difusi neutron merupakan dasar bagi komputasi neutronik fisika teras reaktor. Persamaan difusi digunakan untuk menentukan distribusi fluks spasial dalam reaktor. Dalam merancang reaktor nuklir, distribusi neutron ke seluruh bagian sistem harus diketahui dengan tepat. Hal ini merupakan hal yang sulit karena neutron berinteraksi secara berbeda dengan lingkungan yang berbeda (moderator, bahan bakar, dan lain-lain) di dalam teras reaktor. Neutron mengalami berbagai interaksi ketika mereka bermigrasi melalui sistem. Untuk pendekatan awal, efek keseluruhan dari interaksi ini adalah bahwa neutron mengalami proses difusi dalam teras reaktor seperti difusi suatu gas ke dalam gas yang lain. Pendekatan ini biasanya dikenal sebagai pendekatan difusi berdasarkan teori difusi neutron. Pendekatan ini memungkinkan pemecahan masalah tersebut menggunakan persamaan difusi (Aziz & Lasman, 2001; Monado dkk., 2014; Rivai dkk., 2006).

Persamaan transpor Boltzmann merupakan pernyataan keseimbangan neutron yang pada dasarnya mengklaim bahwa neutron yang diperoleh sama dengan neutron yang hilang. Metode Monte Carlo mampu memecahkan persamaan transpor Boltzmann dengan pendekatan numerik di seluruh sistem yang

dimodelkan. Hal ini menuntut sumber daya komputasi yang sangat besar karena masalahnya dapat memiliki banyak dimensi. Namun, persamaan transpor Boltzmann dapat diperlakukan secara langsung. Versi sederhana dari persamaan transpor Boltzmann ini hanyalah persamaan difusi neutron biasa. Secara alami, banyak asumsi yang harus dipenuhi ketika menggunakan persamaan difusi, tetapi persamaan difusi biasanya memberikan perkiraan yang cukup akurat untuk persamaan transpor (Aziz, 1997; Brewer, 2009).

Analisis dan desain teras reaktor dapat dilakukan dengan menggunakan metode difusi nodal dua kelompok energi (cepat dan termal). Ada dua metode untuk perhitunganampang lintang terhomogenisasi. Pertama, metode deterministik yang menyelesaikan persamaan transpor Boltzmann. Kedua, metode stokastik dikenal sebagai metode Monte Carlo yang memodelkan suatu permasalahan hampir mirip dengan bentuk aslinya (Sood, 2017).

Dewasa ini, teori difusi banyak digunakan dalam desain teras reaktor air bertekanan (*pressurized water reactor*, PWR) atau reaktor air mendidih (*boiling water reactor*, BWR). Teori difusi memberikan deskripsi matematis yang valid tentang fluks neutron. Namun, harus ditekankan bahwa persamaan difusi diturunkan dengan berbagai asumsi, seperti media tak terhingga, seragam dengan penyerapan yang rendah, serta fluks tidak tergantung waktu. Walaupun demikian, teori difusi dapat memberikan pendekatan hasil yang baik dan prediksi yang cukup akurat (Aziz, 1997).

Program komputer Standard Reactor Analysis Code (SRAC) merupakan paket program untuk pengembangan desain neutronik reaktor nuklir yang digunakan untuk menyelesaikan persamaan difusi neutron dengan metode deterministik, sedangkan Monte Carlo Neutron Particle (MCNP) menyelesaikannya dengan metode probabilistik atau stokastik.

B. Pemodelan dan Simulasi Berbasis Komputasi dalam Pengembangan Nuklir

1. Komputasi Reaktor Gas Temperatur Tinggi

Reaktor gas temperatur tinggi (RGTT) makin mendapatkan perhatian dewasa ini. Keterlibatan Indonesia dalam riset internasional RGTT ini ditandai dengan partisipasi penulis dalam kerja sama sembilan negara anggota IAEA dalam mempelajari sifat fisika teras RGTT yang disebut The 5th Coordinated Research Programme on the Evaluation of Core Physics Performance of Gas Cooled Reactor (CRP-5) yang berlangsung pada 2002–2012. Dalam kerja sama itu dilakukan *benchmark analysis* terkait uji coba permulaan pada reaktor HTTR (Jepang) dan HTR-10 (Tiongkok), yang bertujuan mengukur keakuratan alat simulasi yang digunakan dan memvalidasi hasilnya terhadap eksperimen. RGTT diharapkan menjadi reaktor Generasi IV pertama yang beroperasi komersial (Zhang dkk., 2019). Selain itu, penulis juga terlibat dalam perhitungan *benchmark* kritikalitas pertama HTTR, Jepang, dan fasilitas kekritisan ASTRA, Rusia (Aziz, 1999b; Aziz & Rivai, 2003).

Teras HTR-10 yang dijadikan problem *benchmark* CRP-5 ini menggunakan moderator grafit dan pendingin gas helium dengan temperatur *outlet* 700°C dan daya 10 MW. Bahan bakar yang digunakan adalah bola bermuatan partikel UO_2 berlapis TRISO dengan pengayaan 17% dan rasio bahan bakar terhadap moderator dalam teras 57/43. Dengan menggunakan parameter utama fisika teras reaktor HTR-10, konstanta multikelompok untuk reaktor ini dapat dihitung, yaitu menggunakan CELL modul dari SRAC95 dengan pustaka data nuklir yang dipilih JENDL3.2 (Okumura dkk., 2007).

Komputasi faktor multiplikasi (*eigenvalue problem*) kami lakukan menggunakan modul perhitungan difusi CITATION dalam geometri R-Z. Pemodelan teras dapat dilakukan secara sederhana mengingat bentuk reaktor yang silindris dan pemuatan campuran bahan bakar secara homogen antara elemen bakar dan bola grafit sebagai moderator (Aziz & Lasman, 2001). Setiap negara partisipan memilih pemodelan dan simulasi berbasis komputasi masing-masing. Hasil yang kami peroleh dan peserta *benchmark analysis* lain peroleh dirangkum pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Hasil Perhitungan Benchmark berbagai Negara atas Kekritisitas Pertama HTR-10 Tiongkok

Negara	Tinggi Kritis (cm)	k-eff pada T = 20°C	k-eff pada T = 120°C	k-eff pada T = 250 °C
Tiongkok	125,8	1,1197	1,1104	1,0960
Prancis	106	-	-	-
Indonesia	120	1,1281	1,1194	1,1052
Rusia	136	1,1182	1,1079	1,0927

Sumber: Aziz dan Lasman (2001)

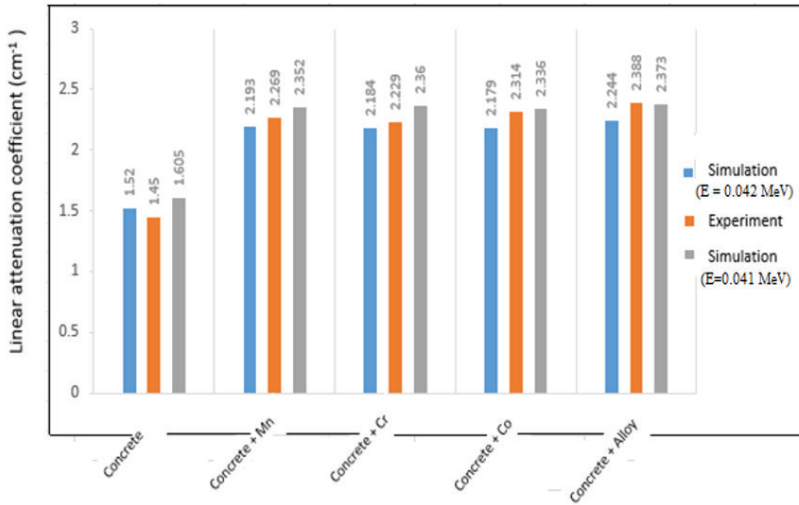
Di sisi lain, dengan telah tercapainya kritikalitas pertama, para peneliti RGTT yang tergabung dalam CRP-5 dapat memvalidasi ketepatan pemodelan dan simulasi berbasis komputasi mereka dalam memprediksi kekritisitas pertama dan karakteristik fisika teras pada awal kekritisitas pertama dan karakteristik fisika teras pada awal kekritisitas (*fresh core*) reaktor ini. Hasil eksperimen yang dilaksanakan tim HTR-10 Tiongkok tersebut menunjukkan bahwa kekritisitas pertama dicapai pada ketinggian 125,8 cm. Pada saat kritis pertama yang dicapai pada Desember 2000 tersebut, jumlah bola bahan bakarnya adalah 9.387 dan jumlah bola moderator adalah 7.131. Massa logam berat uranium adalah 46,9 kg, yang menempati volume 3,06 m³. Laporan hasil komputasi keseluruhan beserta analisis para partisipan dilaporkan oleh IAEA tahun 2013 dalam sebuah dokumen teknis (IAEA, 2013).

Hasil komputasi problem *benchmark* HTR-10 yang kami peroleh menunjukkan bahwa kekritisitas pertama reaktor dicapai pada ketinggian 120 cm yang berarti paling baik dibandingkan hasil perhitungan partisipan negara selain Tiongkok. Hasil perhitungan distribusi fluks neutron termal pada HTR-10 saat kritis pertama dan teras penuh menunjukkan kesesuaian dengan perkiraan teoretis (Aziz, 2000c). Sebagaimana diketahui, HTR-10 menjadi dasar pengembangan reaktor Generasi IV HTR-PM yang dibangun di Shandong, Tiongkok, yang telah mencapai kekritisitas pertama pada September 2021 dan mencapai daya penuh pada 2022.

Manfaat dari kegiatan perhitungan *benchmark* ini adalah dikuasainya teknik desain neutronik sebuah reaktor nuklir, khususnya tipe RGTT. Hal ini tentu berdampak pada tumbuhnya kepercayaan dunia pada kemampuan perhitungan desain neutronik Indonesia. Hal ini akan sangat membantu apabila nanti desain reaktor serupa ini diputuskan untuk dibangun di Indonesia (Aziz, 1999b; Aziz & Lasman, 2001; IAEA, 2013).

2. Simulasi Monte Carlo untuk Pengembangan Bahan Perisai Radiasi Nuklir

Riset bahan perisai telah dilakukan, baik secara eksperimen maupun simulasi berbasis komputasi. Eksperimen dilakukan untuk melihat efektivitas penggunaan komposit beton berbahan baku lokal dan berbagai campurannya sebagai perisai sinar-X dan gamma maupun sebagai perisai neutron yang bersumber dari reaktor nuklir. Komputasi dilakukan dengan MCNP5 dengan geometri input dalam koordinat 3-D Cartesian (x , y , z) yang digambarkan oleh kartu input *cell* dan *surface*. Sumber yang digunakan berupa *disk* yang memancarkan foton maupun neutron secara uniform dan searah. MCNP5 merupakan program komputer yang dapat diaplikasikan untuk menghitung perjalanan partikel, seperti neutron, foton, dan elektron, serta telah teruji dengan baik dalam simulasi perjalanan partikel dan foton di dalam material secara stokastik mulai dari awal diproduksi hingga menghilang, termasuk saat mengalami serapan, fisi, dan hamburan ketika berinteraksi dengan suatu materi. Sifat-sifat bahan serta interaksi partikel dengan bahan dinyatakan dalam fungsi energi kontinu (Aziz, 2018; X-5 Monte Carlo Team, 2003).



Sumber: Aziz dkk. (2018)

Gambar 2.1 Perbandingan Koefisien Atenuasi Linear antara Eksperimen dan Simulasi

Dari eksperimen yang dilakukan, disimpulkan bahwa beton yang dicampur dengan *filler* Co, Cr, Mn, dan baja paduan memiliki kinerja yang lebih baik dalam menahan radiasi sinar-X/gamma dibandingkan beton kontrol tanpa *filler*. Perbedaan antara hasil simulasi dan hasil pengukuran di laboratorium tidak signifikan sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.1 mengenai perbandingan koefisien atenuasi linear bahan yang digunakan (Aziz dkk., 2018).

Hal ini menunjukkan bahwa simulasi menggunakan program MCNP5 ini cukup baik sehingga dapat memperkuat upaya pengembangan material perisai radiasi untuk aplikasi di reaktor nuklir maupun aplikasi industri lainnya serta dapat digunakan untuk riset material maju lainnya. Kegiatan pengembangan bahan perisai radiasi perlu terus ditingkatkan untuk menghadapi tantangan desain reaktor maju yang umumnya beroperasi pada temperatur operasi yang lebih tinggi dan lingkungan radiasi yang lebih besar (Aziz dkk., 2018).

Buku ini tidak diperjualbelikan.

III. PEMANFAATAN SIMULASI BERBASIS KOMPUTASI DALAM PENGEMBANGAN DESAIN REAKTOR PEMBAKAR LIMBAH NUKLIR

Semenjak PLTN pertama dibangun untuk tujuan komersial di Obninsk, Rusia, tahun 1954, teknologinya telah maju pesat dan makin banyak dibangun di banyak negara. Di Indonesia, persiapan menuju PLTN dimulai dengan pengoperasian reaktor-reaktor penelitian serta studi teknologi dan keselamatan reaktor, fisika teras, maupun aspek terkait lainnya. Indonesia tertarik mengembangkan *small modular reactor* (SMR) sebagai salah satu PLTN inovatif yang potensial dan bahkan telah membuat *user requirement document* (URD) bersama IAEA. Reaktor yang dibangun selama sekitar satu dekade pertama setelah Obninsk itu disebut PLTN Generasi I, sedangkan reaktor yang dibangun antara tahun 1960-an dan 1990-an biasanya disebut reaktor Generasi II. Selanjutnya, ada reaktor Generasi III, Generasi III+, dan Generasi IV. PLTN Generasi IV memiliki tujuan yang lebih umum, yaitu desain reaktor dan bahan maju yang digunakan memiliki perbaikan besar dalam keekonomian, keselamatan, keberlanjutan, dan ketahanan proliferasi (Aziz, 2010; Generation IV International Forum, 2014; IAEA, 2000).

Berdasarkan definisi IAEA, desain reaktor maju terdiri atas desain evolusioner maupun yang inovatif. Desain evolusioner ialah desain reaktor yang memperbaiki desain yang sudah ada dengan modifikasi sedikit atau moderat serta penekanan pada

ciri desain yang sudah terbukti guna menekan risiko teknologi. Sementara itu, desain reaktor inovatif memasukkan perubahan secara radikal dalam penggunaan bahan maju untuk struktur dan/atau bahan bakar, lingkungan dan kondisi operasi, serta konfigurasi sistem.

Pemodelan dan simulasi berbasis komputasi di bidang fisika reaktor merupakan kepakaran penulis. Dengannya penulis telah menghasilkan desain sebuah reaktor inovatif pembakar limbah nuklir dan telah berkontribusi penting dalam komputasi fisika teras untuk desain reaktor HTR-10 yang merupakan cikal bakal PLTN Generasi IV, HTR-PM, Tiongkok. Kepakaran ini diharapkan dapat berkontribusi dalam aspek teknologi reaktor secara umum, khususnya dalam analisis desain fisika reaktor atas PLTN tipe apa pun yang kelak akan dibangun di Indonesia.

Dalam rangka pengembangan berbagai jenis reaktor maju dan inovatif lain, termasuk pengembangan bahan strukturnya, telah dilakukan studi penggunaan bahan maju untuk RGTT (Ariani dkk., 2013; Aziz, 1998; Aziz dkk., 2020). Penelitian yang penulis lakukan mengenai desain neutronik reaktor yang mampu membakar limbah nuklir serta beberapa studi desain lainnya, termasuk desain HTGR, dapat mendukung upaya pengembangan PLTN inovatif ini (IAEA, 2000; Rivai dkk., 2003). Penanganan limbah radioaktif yang berasal dari PLTN terus menjadi perhatian masyarakat karena volumenya yang terus meningkat sejalan dengan bertambahnya jumlah PLTN di dunia. Amerika Serikat yang memiliki PLTN terbanyak di dunia menyimpan sementara 86.000 ton bahan bakar bekas dan

limbah ini pun terus bertambah sekitar 2.000 ton setiap tahun. Oleh karena itu, diperlukan strategi penanganan limbah nuklir yang komprehensif (US GAO, 2021).

Bahan bakar bekas PLTN PWR terdiri atas 96% uranium, 1% plutonium, dan 3% aktinida minor (*minor actinides*, MA) dan produk fisi (*fission products*, FP). Beberapa isotop produk fisi memiliki masa hidup yang sangat panjang (*long-life fission products*, LLFP) dan berpotensi menimbulkan bahaya radiasi dalam jangka waktu yang sangat lama. Oleh sebab itu, perlu didesain suatu cara untuk meminimalisasi, baik kuantitas maupun tingkat radioaktivitas limbah nuklir tersebut (Liu dkk., 2022; Wallenius, 2019).

Di beberapa negara (Prancis, Inggris, Jepang), bahan bakar bekas diproses ulang dengan mengekstraksi uranium dan plutonium untuk digunakan lebih lanjut, sedangkan di negara lain (seperti Amerika Serikat) bahan bakar bekas langsung disimpan sebagai limbah nuklir. Sampai saat ini, satu-satunya solusi yang dipertimbangkan secara serius untuk pembuangan limbah berumur panjang adalah penyimpanan di tempat penyimpanan yang stabil secara geologis di bawah tanah. Namun, solusi ini mengandung ketidakpastian keamanan ketika disimpan selama ratusan ribu tahun dan juga selalu mendapatkan opini publik yang negatif. Karena itulah ide untuk melakukan partisi dan transmudasi limbah radioaktif berumur panjang menjadi isotop stabil atau berumur pendek ini dimunculkan. Limbah yang sudah diolah tersebut kemudian dapat disimpan di tanah permukaan.

A. Komputasi Reaktor Pembakar Limbah Nuklir

Konsep desain neutronik teras reaktor yang dapat membakar limbahnya sendiri menjadi menarik karena meningkatnya limbah nuklir akibat pengoperasian PLTN. Inggris, misalnya, pernah menunjukkan minatnya terhadap konsep ini mengingat limbah plutonium yang mereka miliki cukup besar dan dapat menjadi ancaman keamanan. Hasil sebuah studi kelayakan di sana menunjukkan bahwa reaktor cepat PRISM bisa menjadi solusi bagi masalah limbah nuklir tersebut (General Electric, 2018; The Guardian, 2012).

Salah satu desain reaktor maju untuk membakar dan/atau transmudasi (*burning and/or transmutation*, B/T) limbah nuklir telah kami ajukan. Pada prinsipnya, desain reaktor ini mampu membakar dan/atau mentransmutasi limbah nuklir berupa aktinida minor dan produk fisi berumur panjang. Jika semua aktinida dapat diminimalkan dari limbah nuklir, toksisitas radioaktifnya akan dapat dikurangi, bahkan menjadi lebih rendah dari toksisitas uranium alam dalam beberapa ratus tahun saja (Aziz & Kitamoto, 1996a, 1996c; Kitamoto dkk., 1996).

Transmutasi limbah nuklir merupakan salah satu komponen dari siklus bahan bakar nuklir yang sangat diperlukan. Transmutasi bertujuan untuk mengubah sebagian besar sumber radioaktivitas, radiotoksitas, dan panas termal jangka panjang, yang berasal dari plutonium (Pu), aktinida minor (Np, Am, Cm), produk fisi berumur panjang (^{99}Tc , ^{129}I , ^{135}Cs , ^{126}Sn , dan lain-lain) menjadi bahan yang stabil atau berumur pendek (<30 tahun). Tujuan akhirnya ialah mengurangi inventori radiotoksitas dan

volume limbah radioaktif tingkat tinggi (*high level waste*, HLW) yang berasal dari reaktor nuklir dan daur bahan bakarnya guna meningkatkan keberlanjutannya. Dengan transmudasi dan pengolahan produk aktinida minor, diperkirakan toksisitas limbah nuklir bisa dikurangi menjadi hanya satu persennya saja dalam 1.000 tahun (Wakabayashi, 2021).

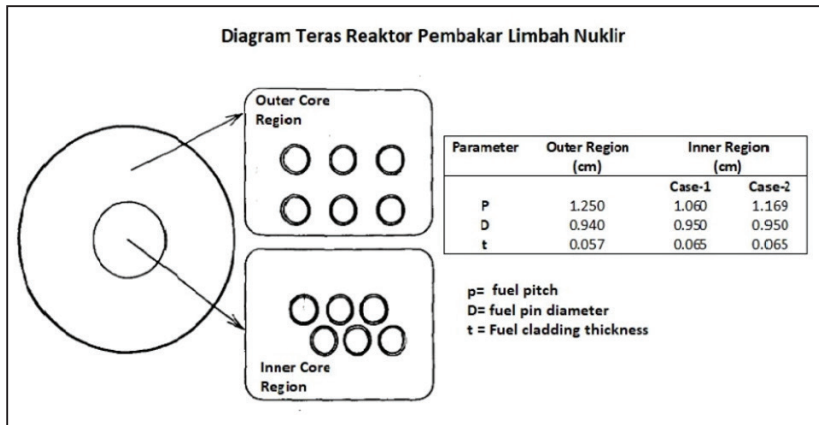
Ukuran potensi risiko yang terkandung dalam HLW adalah radiotoksitas. Sumber utama HLW adalah bahan bakar bekas reaktor nuklir. Dalam jangka panjang, komponen utama radiotoksitas pada bahan bakar bekas adalah unsur transuranik, yaitu Pu dan MA. Oleh karena itu, subjek utama untuk transmudasi adalah TRU. Pada saat yang sama pengurangan TRU akan mengurangi sumber panas jangka panjang yang memungkinkan pengaturan limbah yang lebih kompak di *geological repository*.

Perlakuan B/T untuk memperpendek umur radionuklida berumur panjang telah banyak dibahas dengan menggunakan berbagai tipe reaktor. Setiap tipe reaktor memiliki kelebihan dan kekurangannya sendiri dalam membakar unsur limbah berupa aktinida minor, seperti ^{241}Am , ^{243}Am , ^{244}Cm , dan ^{237}Np . Untuk mencapai B/T secara lengkap dari semua aktinida minor, kami menggunakan konsep reaktor spektrum ganda (*coupled spectrum reactor*, CSR) (Aziz dkk., 1994; Aziz & Kitamoto, 1996a; Mulyanto dkk., 1994b).

Model teras reaktor yang diambil dalam simulasi berbasis komputasi ini mengacu kepada reaktor daya PWR konvensional 1.150 MWe. Desain konseptual reaktor CSR terdiri atas dua zona teras berbasis PWR yang dimodifikasi. Reaktor ini memiliki

spektrum ganda, yaitu spektrum neutron termal di zona luar dan spektrum neutron cepat di zona dalam teras. Kedua spektrum neutron digunakan untuk membakar dan mengubah aktinida minor tertentu pada saat yang sama di masing-masing lokasi dalam teras. Bahan bakar B/T diatur sedemikian rupa sehingga aktinida minor yang berasal dari limbah reaktor air ringan (*light water reactor*, LWR) dicampur homogen dengan *mixed oxide* (MOX) atau bahan bakar UO_2 untuk dijadikan bahan bakar CSR dengan komposisi isotop yang dibakar diasumsikan sama dengan komposisi standar dari bahan bakar bekas PWR.

Geometri bahan bakar untuk sisi teras bagian luar pada CSR mirip dengan PWR konvensional, sedangkan untuk sisi dalam mirip dengan kisi geometri heksagonal pada teras reaktor konversi tinggi (*high conversion reactor*, HCR). Diagram teras reaktor CSR ditunjukkan dalam Gambar 3.1. Tahap pembakaran



Sumber: Aziz dan Kitamoto (1996a)

Gambar 3.1 Teras reaktor pembakar limbah nuklir dibagi dalam dua bagian, yaitu dengan kisi normal di teras bagian luar dan kisi rapat di teras bagian dalam.

ditentukan oleh periode pembakaran yang diperlukan untuk perlakuan B/T terhadap MA dan/atau LLFP dalam reaktor B/T (Aziz & Kitamoto, 1996a, 1996b; Kitamoto dkk., 1996).

Masalah yang terkait dengan penggunaan bahan bakar MOX dalam teras dengan kisi rapat adalah bahwa koefisien *void* cenderung positif dan mengakibatkan inventori plutonium yang besar. Koefisien *void* terutama terkait dengan peningkatan fraksi fisi cepat di ^{235}U dan nilai yang lebih tinggi dari produksi neutron *prompt* oleh ^{239}Pu di wilayah energi yang lebih tinggi. Dalam penelitian ini, masalah tersebut diatasi dengan mengurangi jumlah ^{239}Pu di teras. Untuk mempertahankan panjang siklus bahan bakar yang sama, bahan fisil ^{239}Pu digantikan oleh ^{235}U . Alasan pemilihan ^{235}U adalah, pertama, ^{235}U adalah isotop yang tersedia, dan kedua, perilaku *eta* (jumlah rata-rata neutron dilepaskan untuk setiap neutron yang diserap) relatif tetap dan tidak terlalu bergantung pada energi.

B. Potensi Pemanfaatan Reaktor Pembakar Limbah Nuklir

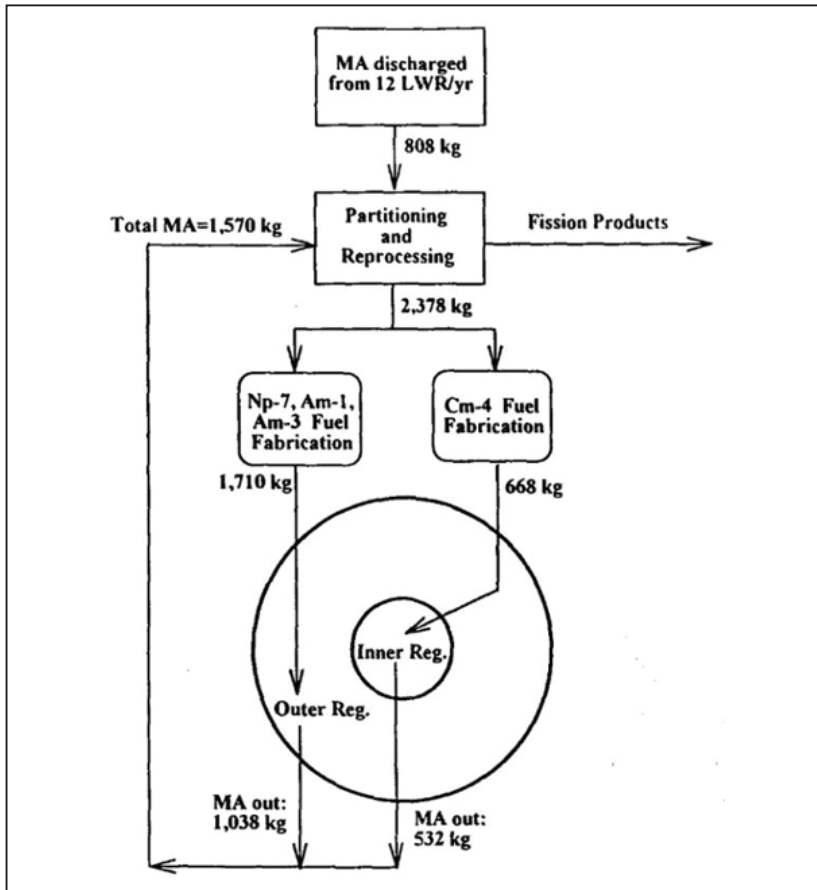
Bahan bakar nuklir sangat padat energi sehingga sangat sedikit yang dibutuhkan untuk menghasilkan listrik dalam jumlah besar—terutama jika dibandingkan sumber energi lain. Akibatnya, limbah yang dihasilkan relatif kecil. Meskipun demikian, limbah nuklir berupa bahan bakar bekas akan menjadi masalah apabila dibiarkan begitu saja.

Selain reaktor B/T, limbah nuklir dapat juga dibakar dan ditransmutasi menggunakan sebuah sistem yang digerakkan

akselerator (*accelerator driven system*, ADS). Dewasa ini, belum ada perangkat ADS yang dibangun di mana pun di dunia. Namun, Uni Eropa, Amerika Serikat, Jepang, dan negara-negara lain telah mengembangkan rencana pembangunan dalam jangka panjang dan membuat peta jalan untuk pengembangan ADS serta melakukan penelitian limbah nuklir terkait yang sesuai (IAEA, 1997; Yan dkk., 2017).

Transmutasi limbah menggunakan reaktor nuklir sejatinya telah diajukan banyak pihak. Transmutasi nuklir adalah konversi satu unsur kimia atau isotop menjadi unsur kimia lain. Transmutasi nuklir terjadi dalam setiap proses di mana jumlah proton atau neutron dalam inti atom berubah. Transmutasi dapat dicapai, baik dengan reaksi nuklir (suatu partikel bereaksi dengan inti atom atau nukleus) maupun dengan peluruhan radioaktif yang tidak diperlukan penyebab dari luar atom itu sendiri (IAEA, 1997; Liu dkk., 2022; Mohamed, 2015).

Hasil perhitungan ini menunjukkan bahwa satu sistem reaktor pembakar limbah nuklir CSR dapat membakar jumlah total aktinida minor dalam kesetimbangan massa input yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Dari gambar ini tampak potensi massa MA yang dapat dibakar di dalam teras CSR, yaitu 1.710 kg neptunium dan amerisium di bagian luar serta 668 kg kurium di bagian dalam sehingga jumlah total MA yang dapat dibakar adalah 2.378 kg. Sebanyak 1.570 kg dari massa MA ini diambil dari sisa pembakaran sebelumnya sehingga MA baru yang dapat dibakar/transmutasi adalah 808 kg. Hal ini setara dengan limbah



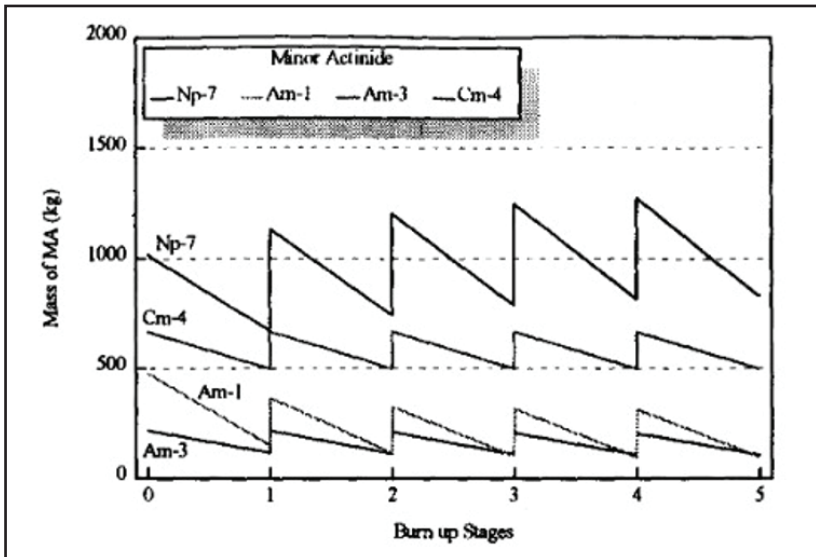
Keterangan: Jumlah ini setara dengan limbah MA yang berasal dari 12 unit PWR konvensional 1.000 MWe dalam setahun

Sumber: Aziz dan Kitamoto (1996a)

Gambar 3.2 Bagan Neraca Kestimbangan Massa dalam Reaktor Pembakar Limbah Nuklir CSR yang Dapat Membakar Total 808 kg MA

MA yang berasal dari 12 unit LWR 1 GWe per tahun (Aziz & Kitamoto, 1996a, 1996c; Kitamoto dkk., 1996; Marsodi dkk., 1994; Mulyanto dkk., 1994a).

Waktu yang dibutuhkan CSR untuk mencapai keadaan ekuilibrium diperoleh dengan melakukan serangkaian perhitungan deplesi sel (*cell depletion*), dimulai dengan komposisi sel tipikal. Hasil perhitungan ini ditunjukkan pada Gambar 3.3. Pada awal setiap tahap pembakaran, massa sekitar 459 kg ^{237}Np , 215 kg ^{241}Am , dan 98 kg ^{243}Am ditambahkan ke dalam reaktor. Dapat dilihat bahwa setelah sekitar lima tahap pembakaran (atau setara dengan 15 tahun pengoperasian reaktor), massa aktinida minor akan mendekati massa kesetimbangannya.



Sumber: Aziz dan Kitamoto (1996a)

Gambar 3.3 Evolusi Massa Aktinida Minor Selama Lima Tahap Pembakaran di CSR

Dengan pola pembakaran seperti ini, tingkat toksisitas limbah nuklir dapat dikurangi secara signifikan sehingga dalam sekitar 300 tahun tingkat toksisitasnya sudah menyamai lingkungan, alih-alih harus menunggu ratusan ribu tahun tanpa perlakuan terhadap limbah aktinida minor ini. Hasil ini menunjukkan bahwa desain reaktor B/T berbasis LWR ini dapat menjadi salah satu metode pengurangan limbah nuklir berbasis reaktor termal yang potensial, manakala konsep reaktor pembakar limbah yang lain pada umumnya berbasis reaktor cepat (Aziz & Kitamoto, 1996a; Kitamoto dkk., 1996; Salvatores, 2012).

Manfaat konsep reaktor pembakar limbah ini, antara lain, pertama, desain ini memiliki kemampuan untuk mengatasi masalah yang terkait dengan akumulasi Cm, Am, dan Np dengan cara dibakar (melalui proses fisi) dan/atau diubah menjadi isotop stabil melalui transmudasi inti. Kedua, menyederhanakan perlakuan B/T terhadap aktinida minor dengan menggunakan teras reaktor tunggal PWR yang dimodifikasi. Ketiga, konsep ini akan mendukung manajemen limbah radioaktif tingkat tinggi lanjutan yang lebih efektif.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

IV. TANTANGAN DAN STRATEGI PEMANFAATAN SIMULASI BERBASIS KOMPUTASI DALAM PENGEMBANGAN REAKTOR NUKLIR

Pemanfaatan hasil pengembangan iptek nuklir di Indonesia diyakini akan meningkat pada masa mendatang, termasuk aplikasi di bidang energi dengan pengembangan desain reaktor nuklir dan material maju untuk struktur, sistem, dan komponen reaktor sebagai pendukungnya. Pemanfaatan teknologi nuklir ini juga akan menjadi bermakna jika implementasi kebijakan pemerintah dapat diintegrasikan dan dipertimbangkan dengan baik ke dalam kerangka pembangunan jangka panjang berbasis pada kemandirian bangsa.

Untuk mendukung hal itu, diperlukan peningkatan dalam pemanfaatan teknologi informasi khususnya dalam bidang pemodelan dan simulasi berbasis komputasi. Strategi yang digunakan, antara lain, melalui pengembangan infrastruktur komputasi, peningkatan kapasitas, dan pelaksanaan kegiatan riset kolaborasi nasional maupun internasional (Aziz, 2018; Soentono & Aziz, 2008).

A. Tantangan Pemanfaatan Komputasi Desain Reaktor Masa Depan

Teknologi informasi saat ini telah berkembang pesat dan menghasilkan prosesor komputer yang makin *powerful* dengan memori yang harganya makin murah. Selain itu, perkembangan

metodologi komputasi numerik dan bahasa pemrograman, seperti bahasa Python yang lebih modern, menjadi tantangan bagi para praktisi komputasi iptek nuklir yang terbiasa dengan bahasa pemrograman yang lebih tua, seperti FORTRAN. Penguasaan wawasan ilmiah di berbagai cabang iptek nuklir juga menjadi tantangan bagi peneliti. Oleh karena itu, mampu memanfaatkan gabungan beberapa program komputer secara terhubung dalam menganalisis sebuah sistem (McClarren, 2017).

Hal lain yang penting dalam pemanfaatan simulasi berbasis komputasi untuk pengembangan nuklir pada masa depan adalah pemanfaatan kecerdasan buatan (*artificial intelligence* [AI]), termasuk *generative* AI, seperti ChatGPT dan Bard yang mampu membangkitkan gambar, teks, suara, video, dan musik. AI mengacu kepada teknologi yang menggabungkan data numerik, algoritma proses *deep learning*, dan terus meningkatnya daya komputasi untuk mengembangkan sistem yang mampu melacak masalah kompleks dengan cara yang mirip dengan logika dan penalaran manusia. Area utama seperti robotika dan pemodelan 3-D telah menarik banyak penelitian dan menghasilkan inovasi dalam konsep Industri 4.0. Teknologi AI dapat menganalisis data dalam jumlah besar untuk mempelajari cara menyelesaikan tugas tertentu, termasuk untuk manajemen bahan bakar reaktor serta eksperimen nuklir. Teknik ini disebut juga pembelajaran mesin (*machine learning*). IAEA bahkan telah mengangkat tema AI ini untuk diaplikasikan dalam membantu menyelesaikan masalah iptek nuklir untuk bidang kesehatan dan energi (Broussard, 2020; Krishnamurthi & Kumar, 2020; Nissan, 2019). Dalam desain reaktor maju Generasi IV dan reaktor pembakar limbah

nuklir dengan konfigurasi teras yang tidak biasa, peran simulasi berbasis komputasi reaktor akan makin menantang, misalnya dalam pemodelan reaktor dengan spektrum neutron cepat, neutron termal, dan sistem ADS (Driscoll & Hejzlar, 2005).

AI ke depan dapat memberikan banyak manfaat dalam pemodelan dan simulasi berbasis komputasi untuk perhitungan desain dan analisis teras reaktor nuklir. Penggunaan AI dapat meningkatkan proses desain dan analisis reaktor maju, meningkatkan karakterisasi margin keamanan, menghasilkan model yang lebih akurat dalam waktu lebih singkat, serta mengurangi biaya selama proses desain dan operasi reaktor. AI juga dapat digunakan untuk memantau kinerja reaktor nuklir, mengidentifikasi masalah potensial, dan memprediksi kebutuhan pemeliharaan reaktor. Namun, penggunaan AI dalam bidang ini juga memiliki tantangan. Salah satunya adalah memastikan bahwa model AI yang digunakan dapat diandalkan dan akurat dalam memprediksi perilaku dunia nyata. Hal ini memerlukan integrasi pengetahuan para ahli nuklir dengan alat AI untuk menghasilkan model yang tepat dan mampu meningkatkan kemampuan prediktif (Koka, 2020).

Tantangan lain yang masih harus diselesaikan adalah kurangnya forum yang sesuai untuk para pelaku pemodelan dan simulasi berbasis komputasi dapat berbagi. Keberadaan forum ini diharapkan akan meningkatkan minat para pelaku pengembangan dalam berkomputasi. Selanjutnya, peningkatan kemampuan komputasi harus dilakukan secara terus-menerus, termasuk melalui pendidikan dan pelatihan, mengingat perkembangan dan pemanfaatan iptek nuklir yang cepat dan makin beragam.

B. Kolaborasi Riset sebagai Strategi Utama

Kolaborasi dengan pelaku komputasi, baik di tingkat nasional maupun kerja sama internasional, merupakan salah satu langkah penting dalam strategi meningkatkan peranan komputasi. Penggalangan kolaborasi dapat dilakukan dengan berbagai pihak di dalam negeri yang diketahui sudah cukup maju dan berpengalaman menggunakan metode komputasi dan simulasi untuk studi reaktor nuklir, seperti Institut Teknologi Bandung, Universitas Gadjah Mada, Universitas Indonesia, Institut Pertanian Bogor, dan Universitas Jember, serta beberapa perguruan tinggi lainnya. Untuk problem yang memerlukan kecepatan komputasi yang tinggi, pelaku komputasi dapat bekerja sama memanfaatkan layanan komputasi di fasilitas *high-performance computing* (HPC) yang ada di BRIN Cibinong. Dalam energi nuklir, HPC dapat meningkatkan efisiensi komputasi di sejumlah bidang, terutama ilmu material, integritas struktur, fisika reaktor, dan termal-hidrolika (Calvin & Nowak, 2010).

Cara peningkatan kemampuan lainnya adalah dengan program *capacity building*, misalnya melalui kegiatan semacam ICTP-BATAN-LIPI Regional School on High Performance Com

puting Tools for Computational Science yang pernah dua kali diselenggarakan di Indonesia. *Workshop* komputasi spesifik juga pernah diadakan di Indonesia, misalnya tentang penggunaan kode SRAC bekerja sama dengan JAEA dan sebelumnya bekerja sama dengan IAEA mengenai penggunaan program 2DB-3DB untuk perhitungan neutronik reaktor dengan teori difusi.

Guna meningkatkan kompetensi dan kemampuan analisis, para pelaku komputasi dapat mengikuti kegiatan semacam *co-ordinated research project* (CRP) yang diselenggarakan oleh IAEA sesuai dengan bidang yang diminati. Pengalaman kami menjadi *principal investigator* pada CRP-5 berjudul Evaluation of HTGCR (High Temperature Gas-Cooled Reactors) Performance pada 2002–2012 dirasakan sangat bermanfaat untuk meningkatkan kemampuan analisis dan komputasi melalui diskusi dan berbagi pengetahuan dengan para peneliti dari negara peserta lainnya. IAEA menawarkan banyak kegiatan CRP baru, seperti di bidang komputasi fisika reaktor dan pengelolaan limbah nuklir (IAEA, 2013, t.t.).

Selain itu, dapat dilakukan pengembangan laboratorium komputasi spesifik sesuai dengan kebutuhan riset maupun yang lebih umum dan berkemampuan tinggi untuk tugas komputasi yang lebih beragam, termasuk untuk menunjang program PLTN. Dengan adanya fasilitas yang memadai, minat praktisi komputasi pemula akan meningkat. Selanjutnya, penyelenggaraan forum khusus di bidang metode komputasi diharapkan akan meningkatkan kolaborasi pemanfaatan pemodelan dan simulasi

berbasis komputasi dalam pelaksanaan pengembangan iptek reaktor nuklir. Pengembangan komputasi reaktor nuklir ini penting dalam rangka persiapan pemanfaatan PLTN, khususnya dalam studi desain teras reaktor (Panitra dkk., 2022) dan material pendukungnya (Dani dkk., 2023). Tenaga nuklir dinilai penting bagi tercapainya target *net-zero emission* (NZE) di tahun 2060 nanti (Safitri, 2022; Abdila, 2022).

V. KESIMPULAN

Pemanfaatan pemodelan simulasi dan komputasi dalam penelitian dan pengembangan reaktor nuklir di Indonesia telah dilakukan sejak awal, yaitu ketika Indonesia mulai mengoperasikan reaktor TRIGA Mark II di Bandung dan Kartini di Yogyakarta. Kegiatan tersebut mendapatkan momentum yang baik ketika RSG-LP Serpong dibangun dan beroperasi sejak akhir 1980-an. Selanjutnya, pemanfaatan komputasi ini menjadi makin marak dan bergairah dengan makin cepat dan murah nya harga komputer. Dewasa ini, pemanfaatan komputasi untuk desain reaktor telah berjalan cukup baik.

Teknik simulasi berbasis komputasi telah berhasil kami gunakan untuk memprediksi kritikalitas pertama reaktor RGTT HTR-10 Tiongkok dengan hasil sangat baik dan merupakan program riset kolaborasi internasional yang didukung IAEA. Selain itu, simulasi berbasis komputasi juga telah dimanfaatkan untuk membantu pengembangan bahan perisai radiasi berbasis komposit beton sebagai bahan komponen reaktor nuklir sesuai dengan perkembangan teknologi bahan dewasa ini.

Selain itu, dengan memanfaatkan pemodelan dan simulasi berbasis komputasi, kami berhasil mendapatkan desain neutronik teras reaktor pembakar limbah nuklir berbasis PLTN PWR konvensional yang tidak hanya dapat membangkitkan energi listrik, tetapi juga mampu mentransmutasi dan/atau membakar limbah nuklir yang berasal dari 12 unit PLTN konvensional. Desain

reaktor ini mampu mengurangi tingkat toksisitas limbah nuklir sehingga akan sama dengan toksisitas alamiah dalam jangka waktu 300 tahun, alih-alih ratusan ribu tahun apabila tanpa perlakuan sama sekali. Reaktor pembakar limbah nuklir sangat mungkin dibangun pada masa depan guna menjamin keberlangsungan energi nuklir yang aman dan selamat.

Kemampuan dalam pemodelan dan simulasi berbasis komputasi untuk pengembangan reaktor nuklir ini diharapkan menjadi modal penting bagi upaya pencapaian target *net-zero emission* melalui pemanfaatan PLTN. Pemanfaatan tenaga nuklir yang dikenal sebagai sumber energi bersih dan efisien penting bagi keberlanjutan dan mengatasi perubahan iklim. Desain reaktor pembakar limbah nuklir ini diharapkan dapat memberikan nilai tambah terhadap upaya tersebut.

VI. PENUTUP

Selama beberapa dekade terakhir, pemodelan dan simulasi berbasis komputasi telah terbukti mampu membantu memperlancar beroperasinya reaktor-reaktor yang ada serta fasilitas laboratorium penunjangnya, termasuk untuk mencari jawaban numerik dalam studi desain neutronik reaktor maju dan reaktor Generasi IV serta pengembangan bahan struktur, sistem, dan komponennya. Komputasi juga telah memberikan wawasan tambahan yang sering kali tidak mungkin diperoleh hanya dengan menggunakan analisis teoretis dan eksperimental saja. Pemanfaatan pemodelan dan simulasi berbasis komputasi telah meningkatkan efisiensi kegiatan ilmiah dengan hasil pengembangan iptek nuklir dapat diperoleh secara lebih cepat, murah, selamat, dan aman.

Pemanfaatan pemodelan dan simulasi berbasis komputasi untuk pengembangan desain reaktor nuklir di Indonesia masih menghadapi masalah dengan kurangnya minat peneliti di bidang ini sehingga *critical mass* dirasakan belum tercapai. Hal ini, antara lain, tak lepas dari belum tegasnya program pembangunan PLTN saat ini, padahal nuklir sebagai sumber energi bersih yang bebas karbon telah diakui dan diterima di banyak negara lain.

Cepatnya perkembangan teknologi informasi dan kecerdasan buatan, khususnya *generative AI*, merupakan hal yang harus diantisipasi dalam aplikasi energi nuklir karena kemampuannya yang sangat baik dalam membuat visualisasi, narasi teks, video,

dan suara. Cukup baiknya minat periset dalam memanfaatkan IT secara umum bisa menjadi oportunity untuk diarahkan ke bidang reaktor nuklir. Untuk itu, perlu peningkatan kompetensi nuklir para pelaku komputasi dengan didukung atmosfer yang baik. Para pemangku kepentingan dapat memfasilitasi hal ini dengan cara memastikan keterbaruan sarana pemodelan dan simulasi berbasis komputasi, menyelenggarakan forum *brainstorming*, dan diskusi, khususnya di bidang desain reaktor nuklir. Kecenderungan munculnya desain reaktor inovatif baru dan reaktor Generasi IV termasuk desain reaktor pembakar limbah nuklir semestinya menjadi tantangan sekaligus kesempatan bagi peneliti untuk mengembangkan kapasitas, kapabilitas, dan daya inovasinya. Pengembangan kapasitas itu selain melalui jalur pendidikan bisa juga melalui keterlibatan dalam program riset kolaboratif nasional maupun internasional. Hal ini diyakini akan membuat makin banyak pelaku pengembangan yang tertarik untuk menggeluti dunia pemodelan dan simulasi berbasis komputasi.

Pada akhirnya, simulasi berbasis komputasi adalah sebuah alat yang telah dimanfaatkan dalam perhitungan desain reaktor atau pengembangan bahan struktur reaktor. Oleh karena itu, pengembangan kompetensi periset sebagai pelaku komputasi harus selalu diutamakan. Para pelaku pengembangan iptek nuklir yang hidup di era Industri 4.0 ini memiliki keistimewaan untuk secara cepat, akurat, aman, dan selamat mendapatkan solusi itu dengan memanfaatkan pemodelan dan simulasi berbasis komputasi.

VII. UCAPAN TERIMA KASIH

Sebelum mengakhiri orasi ini, perkenankan saya menyampaikan sekali lagi rasa syukur saya, *alhamdulillah wasyukurulillah*, atas segala nikmat yang dikucurkan Allah Swt., termasuk di antaranya adalah terlaksananya orasi ini.

Saya ingin menyampaikan terima kasih kepada Presiden Republik Indonesia, Ir. H. Joko Widodo; Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional, Dr. L.T. Handoko; Ketua Majelis Profesor Riset BRIN, Prof. Dr. Ir. Gadis Sri Haryani; Sekretaris Majelis Profesor Riset, Prof. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE., Ph.D; Tim Penelaah Naskah Orasi Ilmiah ORTN, Prof. Dr. Djarot Wisnubroto, Prof. Dr. Ridwan, Prof. Dr. Mukh Syaifudin, Prof. Dr. Ir. Anhar Riza Antariksawan, Prof. Dr. Efrizon Umar M.T., dan Prof. Drs. Paston Sidauruk, Ph.D.

Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Kepala Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) 2019–2021, Prof. Dr. Anhar Riza Antariksawan; Kepala BATAN 2012–2018, Prof. Dr. Djarot Wisnubroto; Prof. Dr. Evvy Kartini; Prof. Syarip; Prof. Yohanes Sardjono; dan Prof. Surian Pinem. Ucapan terima kasih disampaikan kepada Plt. Sekretaris Utama BRIN, Nur Tri Aries Suestiningtyas, M.A., dan Kepala Biro Organisasi dan Sumber Daya Manusia BRIN, Ratih Retno Wulandari, M.Si., atas kesempatan dan perhatian yang diberikan kepada saya. Apresiasi juga kami sampaikan kepada seluruh panitia penyelenggara acara pengukuhan profesor riset hari ini.

Dalam kesempatan ini, saya juga ingin menyampaikan penghargaan kepada Kepala Organisasi Riset Tenaga Nuklir BRIN atas dukungan yang diberikan. Kepada Kepala Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir dan teman sejawat di Kelompok Riset Bahan Struktur, Sistem, dan Komponen Reaktor, serta teman-teman di eks Laboratorium Terpadu Material Temperatur Tinggi PSTBM, dukungan, kerja sama, dan dorongan semangat dari para sejawat sangat saya hargai.

Terima kasih dan apresiasi kepada semua guru yang telah mendidik saya mulai dari tingkat pendidikan dasar hingga pendidikan tinggi. Penghargaan yang tinggi penulis sampaikan kepada Dr. Inamurrahman dari Center for Nuclear Studies PINSTECH, Pakistan, dan Dr. R.P. Gardner dari NCSU Raleigh, Amerika Serikat, yang menanamkan dasar-dasar penelitian pascasarjana, dan juga kepada Prof. Dr. Asashi Kitamoto, serta Prof. Dr. Sekimoto dan Dr. Ninokata dari Tokyo Institute of Technology yang membuka cakrawala saya untuk medan penelitian aplikasi energi dan teknologi reaktor nuklir tingkat lanjut.

Keberadaan saya di mimbar terhormat ini tidak akan terwujud tanpa dorongan semangat dan pengorbanan yang tulus diiringi doa yang terus-menerus yang telah dipanjatkan almarhum kedua orang tua saya, K.H. A. Aziz Masyhur dan Hj. Marhamah Mahzan. Semoga Allah menerima seluruh amal jariyah beliau berdua. Dukungan dan dorongan semangat juga terus ditunjukkan oleh mertua saya, Bapak H. Atwar Nurhadi dan Ibu Hj. Sien Atwar Nurhadi, semoga Allah senantiasa menjaga kesehatan dan memberikan keberkahan bagi beliau berdua.

Juga dukungan dari istri, Diah Kusumawati, dan anak-anakku, Nadia Ihsana, Reza Herdaning, Firman Imaduddin, Farid Azzeddin, dan Fadli Azzeddin yang menjadi pemacu semangat dan peneguh hati dalam menghadapi berbagai ujian dan rintangan. Semoga hal itu membawa kita ke dalam golongan orang-orang yang ikhlas dan selalu dalam keberkahan dan ridho Allah Swt. Kepada kakak-kakak dan adik-adik, saya berterima kasih atas doa dan dukungannya.

Akhirnya, dengan kerendahan hati saya mohon maaf atas segala khilaf dan kekurangan yang terdapat dalam orasi ilmiah ini. Terima kasih kepada para hadirin atas kesediaannya datang mendengarkan orasi ini. Semoga Allah Swt. senantiasa memberi kita petunjuk dengan ilmu dan amal yang bermanfaat, serta mencurahkan rahmat dan hidayah-Nya. Aamiin.

Wassalaamu 'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdila, R. (2022, 25 November). *Menteri ESDM Arifin Tasrif tekankan pentingnya kolaborasi untuk capai target net zero emission*. *Tribunnews.com*. <https://www.tribunnews.com/bisnis/2022/11/25/menteri-esdm-arifin-tasrif-tekankan-pentingnya-kolaborasi-untuk-capai-target-net-zero-emission>
- Ariani, M., Su'ud, Z., Monado, F., Waris, A., Khairurrijal, Arif, I., **Aziz, F.**, & Sekimoto, H. (2013). Optimization of small long life gas cooled fast reactors with natural uranium as fuel cycle input. *Applied Mechanics and Materials*, 261–262, 307–311. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.260-261.307>
- Arkundato, A., Hasan, M., Purwandari, E., Pramutadi, A., & **Aziz, F.** (2019). Temperature dependence diffusion coefficients of iron, boron and iron-boron calculated by molecular dynamics method. Dalam *Journal of Physics: Conference series 1170* (012008). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1170/1/012008>
- Aziz, F.** (1994a). ABWR, Hasil sebuah evolusi teknologi. *Majalah Teknologi*.
- Aziz, F.** (1994b). Memanfaatkan plutonium bekas senjata nuklir. *Majalah Teknologi*.
- Aziz, F.** (1997). Penggunaan SRAC-EWS untuk perhitungan neutronik teras coupled spectrum reactor. Dalam *Lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir VII*.
- Aziz, F.** (1998). Karakterisasi PWR pembakar untuk mengeliminasi neptunium dan americium. Dalam *Prosiding pertemuan dan presentasi ilmiah penelitian dasar ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir*.
- Aziz, F.** (1999a). ADS konsep PLTN masa depan. *Majalah Teknologi*.
- Aziz, F.** (1999b). IAEA benchmark calculation results of HTTR's start-up core physics test, 'Results of benchmark calculation

on start-up core physics of high temperature engineering test reactor'. Dalam *JAERI-Memo 11-030*.

Aziz, F. (2000a). GT-MHR reaktor pemusnah plutonium bekas senjata nuklir. *Majalah Teknologi*.

Aziz, F. (2000b). Memboyong reaktor temperatur tinggi. *Majalah Teknologi*.

Aziz, F. (2000c). Perhitungan benchmark nilai reaktivitas elemen kendali reaktor temperatur tinggi HTR-10. Dalam *Lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir XI*.

Aziz, F. (2010, November 29). How safe is nuclear power for Indonesia? *The Jakarta Post*, A5–A6.

Aziz, F. (2018). Penelitian dan pengembangan material struktur reaktor maju. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 20(1), 41–51. <https://media.neliti.com/media/publications/261692-none-b3d9a1ce.pdf>

Aziz, F., & Hasan, Y. (2012). Kerangka peraturan perundang-undangan program pembangunan PLTN. *Jurnal Forum Nuklir (JFN)*, 6(1), 94–113.

Aziz, F., & Jujuratisbela, U. (1987). Penentuan reaktivitas lebih pada teras pertama RSG GA Siwabessy. Dalam *Seminar teknologi daur bahan bakar dan keselamatan nuklir* (107–115).

Aziz, F., & Kitamoto, A. (1996a). Concept on coupled spectrum B/T (burning and/or transmutation) reactor for treatment of minor actinides by thermal and fast neutrons. *Annals of Nuclear Energy*, 23(15), 1239–1248. [https://doi.org/10.1016/0306-4549\(95\)00133-6](https://doi.org/10.1016/0306-4549(95)00133-6)

Aziz, F., & Kitamoto, A. (1996b). Improvement of inherent safety features in CSR (coupled spectrum reactor) for treating MA. Dalam M. Aritomi, & G. Cho (Ed.), *Proceedings of the 2nd Japan-Korea seminar on advanced reactors*, 271–274.

Aziz, F., & Kitamoto, A. (1996c). A concept of coupled spectrum burning and/or transmutation reactor for treatment of minor actinides. Dalam *ICENES '96*.

- Aziz, F., & Lasman, A. N.** (2001). Analisis pasca-kritikalitas pertama reaktor temperatur tinggi HTR-10 China. Dalam *Lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir XII*.
- Aziz, F., & Rivai, A. K.** (2002). Analisis unjuk kerja fisika teras reaktor cepat modular berpendingin timbal-bismuth. Dalam *Lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir XIII*.
- Aziz, F., & Rivai, A. K.** (2003). Analisis pasca-kritikalitas reaktor temperatur tinggi prismatic HTTR. Dalam *Lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir XIV* (25–40).
- Aziz, F., & Santoso, B.** (1993). Penggunaan paket program 3DB untuk desain dan analisis neutronik tiga dimensional teras reaktor. Dalam *Lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir III* (239–247).
- Aziz, F., Mardiyanto, & Rivai, A. K.** (2021). *PLTN dan riset material reaktor maju*. Penerbit Deepublish.
- Aziz, F., Mulyanto, & Marsodi.** (1994). On the sodium loss reactivity of fast B/T reactor. Dalam *Third scientific meeting of Indonesian atomic energy students in Japan* (468–474).
- Aziz, F., Panitra, M., & Rivai, A. K.** (2018). Synthesis and Monte Carlo simulation of improved concrete composites for enhanced x-ray/gamma ray radiation shielding. *International Journal of Technology*, 9(4), 695–706. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v9i4.1723>
- Aziz, F., Panitra, M., Rivai, A. K., Silalahi, M., Sabrina, N., Dani, M., Setiawan, M. B., & Setiadipura, T.** (2020). Investigation on neutronic properties of ZrC coated advanced TRISO fuel for high-temperature gas-cooled reactors. Dalam *Journal of physics: Conference series 1436* (012036). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1436/1/012036>
- Aziz, F., Rivai, A. K., Panitra, M., Dani, M., & Suharno, B.** (in press). Accident tolerant fuel cladding materials for light water reactors: Analysis of neutronic characteristics. *International Journal of Technology*.

- Aziz, F., Su'ud, Z., Asril, P., Fenny, R., & Debby, M. (2007).** Design study of long life HTGR using thorium cycle (General characteristics). Dalam *International conference on advances in nuclear science and engineering in conjunction with LKSTN 2007* (213–216).
- Brewer, R. (2009). *Criticality calculations with MCNP5: A primer* (Third edition, LA-UR-09-00380). Los Alamos National Laboratory.
- Broussard, E. (2020). *The future of atoms: Artificial intelligence for nuclear applications*. IAEA. <https://www.iaea.org/newscenter/news/the-future-of-atoms-artificial-intelligence-for-nuclear-applications>
- Calvin, C., & Nowak, D. (2010). High performance computing in nuclear engineering. Dalam D. G. Cacuci (Ed.), *Handbook of nuclear engineering* (1449–1517). Springer. https://doi.org/10.1007/978-0-387-98149-9_12
- Dani, M., **Aziz, F.**, Farihin, P., Dimiyati, A., Sukaryo, S. G., Lesmana, J. G., Insani, A., Mustofa, S., Panitra, M., & Huang, C. A. (2023). Microstructures of austenitic stainless steel 56Fe25Ni16.6Cr0.9Si0.5Mn solid-treated with different cooling rates. *Philippine Journal of Science*, 152(3), 989–998.
- Donovan, J., & Watson, N. (2022). *IAEA joins Indonesia for G20 event highlighting nuclear power for clean energy transition*. IAEA. <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-joins-indonesia-for-g20-event-highlighting-nuclear-power-for-clean-energy-transition>
- Driscoll, M. J., & Hejzlar, P. (2005). Reactor physics challenges in Gen-IV reactor design. *Nuclear Engineering and Technology*, 37(1), 1–10. <http://www.kns.org/jknsfile/v37/JK0370001.pdf>
- General Electric. (2018, 13 November). *GE Hitachi and PRISM selected for U.S. department of energy's versatile test reactor program* [Siaran pers]. <https://www.ge.com/news/press-releases/ge-hitachi-and-prism-selected-us-department-energys-versatile-test-reactor-program>

- Generation IV International Forum. (2014). *Technology roadmap update for generation IV nuclear energy systems*. NEA-OECD. <https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2014-03/gif-tru2014.pdf>
- Harto, A. W., **Aziz, F.**, & Tabah, J. (2003). Studi reaktor air berat lanjut (advanced HWR) dengan konsep moderator ganda. Dalam *Seminar nasional TKPFN-9* (125–137).
- Hernández, A. R., Gómez-Torres, A. M., & del Valle-Gallegos, E. (2018). Nuclear reactor simulation. Dalam N. S. Awwad, & S. A. AlFaify (Ed.), *New trends in nuclear science*. IntechOpen.
- International Atomic Energy Agency. (1995). *Computerization of operation and maintenance for nuclear power plants* (IAEA-TEC-DOC-808).
- International Atomic Energy Agency. (1997). *Accelerator driven systems: Energy generation and transmutation of nuclear waste: Status report* (IAEA-TECDOC-985). https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_985_prn.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2000). *Guidance for preparing user requirements documents for small and medium reactors and their application* (IAEA-TECDOC-1167). https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1167_prn.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2013). *Evaluation of high temperature gas cooled reactor performance: Benchmark analysis related to the PBMR-400, PBMM, GT-MHR, HTR-10 and the ASTRA critical facility* (IAEA TECDOC-1694). https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1694_web.pdf
- International Atomic Energy Agency. (t.t.). *Coordinated research projects*. Diakses pada 25 Juni, 2022, dari <https://www.iaea.org/projects/coordinated-research-projects>
- Jujuratisbela, U., & **Aziz, F.** (1987a). Eksperimen fisika reaktor dalam tahap awal komisioning nuklir RSG GA Siwabessy. Dalam *Seminar teknologi daur bahan bakar dan keselamatan nuklir* (171–178).

- Jujuratisbela, U., & Aziz, F. (1987b). Pengukuran nilai reaktivitas batang pengatur reaktor RSG GA Siwabessy dengan metode Rod Drop. Dalam *Seminar teknologi daur bahan bakar dan keselamatan nuklir*.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2022, 29 November). *Pemerintah sampaikan daftar inventarisasi masalah RUU EBET ke DPR RI* [Siaran pers]. <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/pemerintah-sampaikan-daftar-inventarisasi-masalah-ruu-ebet-ke-dpr-ri>
- Kitamoto, A., Mulyanto, & Aziz, F. (1996). Optimization of partitioning and burning and/or transmutation treatment based on three criteria in self-completed fuel cycle. Dalam *ICENES '96*.
- Koka, J. (2020, 25 Maret). *Argonne uses artificial intelligence to improve the safety and design of advanced nuclear reactors*. Argonne National Laboratory. <https://www.anl.gov/article/argonne-uses-artificial-intelligence-to-improve-the-safety-and-design-of-advanced-nuclear-reactors>
- Krishnamurthi, R., & Kumar, A. (2020). Modeling and simulation for industry 4.0. Dalam A. Nayyar, & A. Kumar (Ed.), *A roadmap to industry 4.0: Smart production, sharp modeling and simulation for industry 4.0* (Seri buku: *Advances in science, technology & innovation*) (127–141). https://doi.org/10.1007/978-3-030-14544-6_7
- Liu, B., Jia, R., Han, R., Lyu, X., Han, J., & Li, W. (2018). Minor actinide transmutation characteristics in AP1000. *Annals of Nuclear Energy*, 115, 116–125. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.01.031>
- Liu, F., Zhang, W., Liu, B., Lyu, X., Wang, J., Niu, F., & Yan, P. (2022). Fuel depletion characteristics of MA transmutation in PWR. *Nuclear Materials and Energy*, 30(March), 101119. <https://doi.org/10.1016/j.nme.2022.101119>
- Mardiyanto, Aziz, F., & Rivai, A. K. (2021). *Komputasi dalam litbang material struktur dan fungsional reaktor nuklir*. Penerbit Deepublish.

- Maria, A. (1997). Introduction to modeling and simulation. Dalam S. Andradóttir, K. J. Healy, D. H. Withers, & B. L. Nelson (Ed.), *Proceedings of the 1997 winter simulation conference* (7–13). <http://acqnotes.com/Attachments/White Paper Introduction to Modeling and Simulation by Anu Maria.pdf>
- Marsodi, Mulyanto, **Aziz, F.**, & Kitamoto, A. (1994). Out-core optimization of P-T treatment for effective and safe disposal of HLW. Dalam *Third scientific meeting of Indonesian atomic energy students in Japan* (445–452).
- McClarren, R. G. (2017). *Computational nuclear engineering and radiological science using Python*. Elsevier.
- Meriyanti, Su'ud, Z., Rijal, K., Zuhair, **Aziz, F.**, & Sekimoto, H. (2010). Preliminary design study of medium sized gas cooled fast reactor with natural uranium as fuel cycle input. Dalam *AIP conference proceedings 1244* (62–69). <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4757158>
- Mohamed, N. M. A. (2015). Design of a PWR for long cycle and direct recycling of spent fuel. *Nuclear Engineering and Design*, 295, 559–566. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nuceng-des.2015.10.018>
- Monado, F., Ariani, M., Su'ud, Z., Waris, A., Basar, K., **Aziz, F.**, Permana, S., & Sekimoto, H. (2014). Conceptual design study on very small long-life gas cooled fast reactor using metallic natural Uranium-Zr as fuel cycle input. Dalam *AIP conference proceedings 1584* (105–108). <https://doi.org/10.1063/1.4866113>
- Mulyanto, Marsodi, **Aziz, F.**, & Kitamoto, A. (1994a). Grouping concept in partitioning for HLW disposal in fission reactor. Dalam *Third scientific meeting of Indonesian atomic energy students in Japan* (202–212).
- Mulyanto, Marsodi, **Aziz, F.**, & Kitamoto, A. (1994b). Maximisation of burning and/or transmutation rate of fast B/T reactor by neutron energy shift. Dalam *Third scientific meeting of Indonesian atomic energy students in Japan* (45–50).

- Nissan, E. (2019). An overview of AI methods for in-core fuel management: Tools for the automatic design of nuclear reactor core configurations for fuel reload, (re)arranging new and partly spent fuel. *Designs*, 3(3), 1–45. <https://doi.org/10.3390/designs3030037>
- Okumura, K., Kugo, T., Kaneko, K., & Tsuchihashi, K. (2007). *SRAC2006: A comprehensive neutronics calculation code system* (JAEA-Data/Code 2007-004). Japan Atomic Energy Agency. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.11484/jaea-data-code-2007-004>
- Panitra, M. M., Aziz, F., Rivai, A. K., Sukaryo, S. G., Fisli, A., Sudirman, & Parikin. (2021). Rubber based neutron shielding material simulation using MCNP5. Dalam *AIP conference proceedings 2381* (020054). <https://doi.org/10.1063/5.0066597>
- Panitra, M. M., Rivai, A. K., & Aziz, F. (2022). Simulation study on the effect of ODS cladding material on the criticality of nuclear reactors using MCNP5. Dalam *AIP conference proceedings 2501* (040010). <https://doi.org/10.1063/5.0095704>
- PRSG BATAN. (2011). *Laporan analisis keselamatan (LAK) RSG-GAS rev. 10.1*.
- Rivai, A. K., Aziz, F., & Takahashi, M. (2006). Design study of 300 MWt PWR fueled with UO₂ coated fuel particle. Dalam *Proceedings of the 14th international conference on nuclear engineering* (593–597).
- Rivai, A. K., Su'ud, Z., & Aziz, F. (2003). Design study of modular lead-bismuth cooled fast reactors with nitride fuel. *Indonesian Journal of Physics*, 14(4), 214–218. <http://ijphysics.com/index.php/ijp/article/view/69>
- Safitri, K. (2022, 29 November). *RUU EBT atur pembangkit listrik tenaga nuklir*. Kompas.com. <https://money.kompas.com/read/2022/11/29/181130426/ruu-ebt-atur-pembangkit-listrik-tenaga-nuklir>
- Salvatores, M. (2012). Partitioning and transmutation of spent nuclear fuel and radioactive waste. Dalam I. Crossland (Ed.), *Nuclear fuel cycle science and engineering* (501–530). Woodhead Publishing.

- Soentono, S., & Aziz, F. (2008). Expected role of nuclear science and technology to support the sustainable supply of energy in Indonesia. *Progress in Nuclear Energy*, 50(2–6), 75–81.
- Sood, A. (2017, 10 Juli). *The Monte Carlo method and MCNP – A brief review of our 40 year history* [Presentasi]. The International Topical Meeting on Industrial Radiation and Radioisotope Measurement Applications Conference, Chicago, Illinois, Amerika Serikat.
- Subki, I. R. (1993). Establishment of computer code system for nuclear reactor design analysis. Dalam *Lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir III*.
- Sudarsono, B., Bunjamin, M., & Djokolelono, M. (1988). Recent exercise on WASP: An outlook for the Java system. Dalam *Experience with WASP and MAED among IAEA member states participating in the regional co-operative agreement (RCA) in Asia and the Pacific region* (IAEA TECDOC-528) (93–102). International Atomic Energy Agency.
- The Guardian. (2012, 30 Juli). *Are fast-breeder reactors the answer to our nuclear waste nightmare?* <https://www.theguardian.com/environment/2012/jul/30/fast-breeder-reactors-nuclear-waste-nightmare>
- US GAO. (2021). *Commercial spent nuclear fuel: Congressional action needed to break impasse and develop a permanent disposal solution*. <https://www.gao.gov/products/gao-21-603>
- Wakabayashi, T. (2021). Concept of a fast breeder reactor to transmute MAs and LLFPs. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01986-w>
- Wallenius, J. (2019). Maximum efficiency nuclear waste transmutation. *Annals of Nuclear Energy*, 125, 74–79. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.10.034>
- Winsberg, E. (2019). Computer simulations in science. Dalam E. N. Zalta (Ed.), *The Stanford encyclopedia of philosophy* (Winter 2019 edition). Stanford University. <https://plato.stanford.edu/archives/win2019/entries/simulations-science/>

- X-5 Monte Carlo Team. (2003). *MCNP—A general n-particle transport code, Version 5* (Vol. 1: Overview and theory, LA-UR-03-1987). Los Alamos National Laboratory
- Yan, X., Yang, L., Zhang, X., & Zhan, W. (2017). Concept of an accelerator-driven advanced nuclear energy system. *Energies*, *10*(7), 1–13. <https://doi.org/10.3390/en10070944>
- Zhang, Z., Dong, Y., Qi, W., & Sun, J. (2019, 26 Februari). *HTR-PM: Making dreams come true*. Nuclear Engineering International. <https://www.neimagazine.com/features/featurehtr-pm-making-dreams-come-true-7009889/>

DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

Buku Internasional

1. International Atomic Energy Agency. (2013). *Evaluation of high-temperature gas cooled reactor performance: Benchmark analysis related to the PBMR-400, PBMM, GT-MHR, HTR-10 and the ASTRA critical facility* (IAEA-TECDOC-1694, **Aziz, F.**, kontributor).
2. International Atomic Energy Agency. (2003). *Evaluation of high-temperature gas cooled reactor performance: Benchmark analysis related to initial testing of the HTTR and HTR-10* (IAEA-TECDOC-1382, **Aziz, F.**, kontributor).
3. International Atomic Energy Agency. (2001). *Design and evaluation of heat utilization systems for the high-temperature engineering test reactor* (IAEA-TECDOC-1236, **Aziz, F.**, kontributor).

Buku Nasional

4. **Aziz, F.**, Mardiyanto, & Rivai, A. K. (2021). *PLTN dan riset material reaktor maju*. Penerbit Deepublish.
5. Mardiyanto, **Aziz, F.**, & Rivai, A. K. (2021). *Komputasi untuk penelitian material maju*. Penerbit Deepublish.

Jurnal Internasional

6. **Aziz, F.**, Panitra, M., Rivai, A. K., Dani, M., & Suharno, B. (in press). Accident tolerant fuel cladding materials for light water reactors: Analysis of neutronic characteristics. *International Journal of Technology*.
7. Dani, M., **Aziz, F.**, Parikin, F., Dimiyati, A., Sukaryo, S. G., Lesmana J. G., Insani, A., Mustofa, S., Panitra, M., & Huang,

- C. A. (2023). Microstructures of austenitic stainless steel 56Fe-25Ni16.6Cr0.9Si0.5Mn solid-treated with different cooling rates. *Philippines Journal of Science*, 152(3), 989–998.
8. **Aziz, F.**, Panitra, M., & Rivai, A. K. (2018). Synthesis and Monte Carlo simulation of improved concrete composites for enhanced x-ray/gamma-ray radiation shielding. *International Journal of Technology*, 9(4), 695–706.
 9. Ariani, M., Su'ud, Z., Monado, F., Waris, A., Khairurrijal, Arif, I., **Aziz, F.**, & Sekimoto, H. (2012). Optimization of small long-life gas-cooled fast reactors with natural uranium as fuel cycle input. *Applied Mechanics and Materials*, 260–261, 307–311.
 10. Soentono, S., & **Aziz, F.** (2008). Expected role of nuclear science and technology to support the sustainable supply of energy in Indonesia. *Progress in Nuclear Energy*, 50(2–6), 75–81.
 11. **Aziz F.**, & Kitamoto, A. (1996). Concept on coupled spectrum B/T (burning and/or transmutation) reactor for treatment of minor actinides by thermal and fast neutrons. *Annals of Nuclear Energy*, 23(15), 1239–1248.

Jurnal Nasional

12. Parikin, P., Dani, M., Dimyati, A., Insani, A., Deswita, D., **Aziz, F.**, Mardiyanto, M., Mustofa, S., Purwanto, S., Adhika, D. R., Syahbuddin, S., & Huang, C. A. (2022). Effects of plasma sintering on the post TIG weld joint of Fe-15Cr-25Ni austenitic stainless steel Fe-15Cr-25Ni austenitic stainless steel. *Makara Journal of Technology*, 26(1), 13–22.
13. Silalahi, M., Wicaksana, H., **Aziz, F.**, Ahda, S., & Iskandar, M. A. (2020). New synthesized microalloys steel ODS of high amplitude ultrasonically irradiation. *Makara Journal of Technology*, 23(3), 111–118.
14. **Aziz, F.** (2018). Penelitian dan pengembangan material struktur reaktor maju. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 20(1), 41–51.

15. Silalahi, M., Rahayu, D. N., Sugeng, B., **Aziz, F.**, & Sukaryo, G. (2018). Sintesis paduan Co-Cr menggunakan metode ultrasonic. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 19(3), 131–136.
16. **Aziz, F.**, & Hasan, Y. (2012). Kerangka peraturan perundang-undangan program pembangunan PLTN. *Jurnal Forum Nuklir*, 6(1), 94–113.
17. Rivai, A. K., Su'ud, Z., & **Aziz, F.** (2003). Design study of modular lead-bismuth cooled fast reactors with nitride fuel. *Indonesian Journal of Physics*, 14(4), 214–218.

Prosiding Internasional

18. Panitra, M. M., Rivai, A. K., & **Aziz, F.** (2022). Simulation study on the effect of ODS cladding material on the criticality of nuclear reactors using MCNP5. Dalam *AIP conference proceedings 2501* (040010).
19. Panitra, M. M., Parikin, **Aziz, F.**, Rivai, A. K., & Ahda, S. (2021). Single crystal FeNi based superalloys melting temperature and mechanical testing simulation using LAMMPS. Dalam *AIP conference proceedings 2381* (020055).
20. Panitra, M. M., **Aziz, F.**, Rivai, A. K., Sukaryo, S. G., Fisli, A., Sudirman, & Parikin. (2021). Rubber based neutron shielding material simulation using MCNP5. Dalam *AIP conference proceedings 2381* (020054).
21. **Aziz, F.**, Panitra, M., Rivai, A. K., Silalahi, M., Sabrina, N., Dani, M., Setiawan, M. B., & Setiadipura, T. (2020). Investigation on neutronic properties of ZrC coated advanced TRISO fuel for high-temperature gas-cooled reactors. Dalam *Journal of physics: Conference series 1436* (012036).
22. Arkundato, A., Hasan, M., Purwandari, E., Pramutadi, A., & **Aziz, F.** (2019). Temperature dependence diffusion coefficients of iron, boron and iron-boron calculated by molecular dynamics method. Dalam *Journal of physics: Conference series 1170* (012008).

23. Monado, F., Ariani, M., Su'ud, Z., Waris, A., Basar, K., **Aziz, F.**, Permana, S., & Sekimoto, H. (2014). Conceptual design study on very small longlife gas cooled fast reactor using metallic natural Uranium-Zr as fuel cycle input. Dalam *AIP conference proceedings 1584* (105–108).
24. Su'ud, Z., Rosidah, I., Afifah, M., **Aziz, F.**, & Sekimoto, H. (2013). Comparative study for axial and radial shuffling scheme effect on the performance of Pb-Bi cooled fast reactors with natural uranium as fuel cycle input. Dalam *International nuclear science, technology and engineering conference 2013*.
25. Irka, F. H., Su'ud, Z., Aryani, M., **Aziz, F.**, & Sekimoto, H. (2012). Design study of gas cooled fast reactors using natural uranium as fuel cycle input employing radial shuffling strategy. Dalam *AIP conference proceedings 1448* (74–81).
26. Asiah, A. N., Su'ud, Z., **Aziz, F.**, & Sekimoto, H. (2010). Conceptual design study of small long-life gas cooled fast reactor with modified CANDU burn-up scheme. Dalam *AIP conference proceedings 1244* (31–36).
27. Meriyanti, Su'ud, Z., Rijal, K., Zuhair, **Aziz, F.**, & Sekimoto, H. (2010). Preliminary design study of medium sized gas cooled fast reactor with natural uranium as fuel cycle input. Dalam *AIP conference proceedings 1244* (62–69).
28. **Aziz, F.**, Su'ud, Z., Asril, P., Fenny, R., & Debby, M. (2007). Design study of long life HTGR using thorium cycle (general characteristics). Dalam *International conference on advances in nuclear science and engineering in conjunction with LKSTN 2007* (213–216).
29. Rivai, A. K., **Aziz, F.**, & Takahashi, M. (2006). Design study of 300 MWt PWR fueled with UO₂ coated fuel particle. Dalam *Proceedings of the 14th international conference on nuclear engineering* (593–597).

30. **Aziz, F.**, & Kitamoto, A. (1996). Improvement of inherent safety features in CSR (coupled spectrum reactor) for treating MA. Dalam M. Aritomi, & G. Cho (Ed.), *Proceedings of the 2nd Japan-Korea seminar on advanced reactors*.
31. Kitamoto, A., Mulyanto, & **Aziz, F.** (1996). Optimization of partitioning and burning and/or transmutation treatment based on three criteria in self-completed fuel cycle. Dalam *ICENES '96*.
32. **Aziz, F.** & Kitamoto, A. (1996). A concept of coupled spectrum burning and/or transmutation reactor for treatment of minor actinides. Dalam *ICENES '96*.
33. Mulyanto, Marsodi, **Aziz, F.**, & Kitamoto, A. (1994). Maximization of burning and/or transmutation rate of fast b/t reactor by neutron energy shift. Dalam *Third scientific meeting of Indonesian atomic energy students in Japan* (45–50).
34. **Aziz, F.**, Mulyanto, Marsodi, & Kitamoto, A. (1994). ENDF/BVI data processing using NJOY91.38. Dalam *Third scientific meeting of Indonesian atomic energy students in Japan* (31–38).
35. **Aziz, F.**, Mulyanto, & Marsodi. On the sodium loss reactivity of fast B/T reactor. (1994). Dalam *Third scientific meeting of Indonesian atomic energy students in Japan* (468–474).
36. Mulyanto, Marsodi, **Aziz, F.**, & Kitamoto, A. (1994). Grouping concept in partitioning for HLW disposal in fission reactor. Dalam *Third scientific meeting of Indonesian atomic energy students in Japan* (202–212).
37. **Aziz, F.** (1994). Bakar dan transmudasi: Opsi penting daur bahan bakar nuklir. Dalam *Temu ilmiah III PPI-Jepang* (126–132).
38. Marsodi, Mulyanto, **Aziz, F.**, & Kitamoto, A. (1994). Basic characteristics of hard spectrum fast burning and/or transmutation reactor. Dalam *Third scientific meeting of Indonesian atomic energy students in Japan* (475–485).

Prosiding Nasional

39. **Aziz, F.**, & Hasan, Y. (2010). Kerangka peraturan perundang-undangan untuk program pembangunan PLTN. Dalam *Seminar nasional VI SDM teknologi nuklir* (179–199).
40. Pandiangan, T., Suwoto, Zuhair, & **Aziz, F.** (2005). Aplikasi kriptografi untuk sistem keamanan penyimpanan data atau informasi hasil-hasil penelitian yang bersifat rahasia. Dalam *Lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir XVI* (97–116).
41. **Aziz, F.**, & Rivai, A. K. (2003). Analisis pasca-kritikalitas reaktor temperatur tinggi prismatik HTTR. Dalam *Lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir XIV* (25–40).
42. Harto, A. W., **Aziz, F.**, & Tabah, J. (2003). Studi reaktor air berat lanjut (advanced HWR) dengan konsep moderator ganda. Dalam *Seminar nasional teknologi dan keselamatan PLTN serta fasilitas nuklir ke-9 (TKPFN-9)* (125–137).
43. Rivai, A. K., **Aziz, F.**, & Su'ud, Z. (2002). Analisis void pada reaktor cepat kecil berpendingin timbal-bismuth. Dalam *Seminar nasional teknologi dan keselamatan PLTN serta fasilitas nuklir (TKPFN) VII*.
44. **Aziz, F.**, & Lasman, A. N. (2002). Baterai nuklir sebagai alternatif sumber listrik arus searah. Dalam *Seminar nasional teknologi dan keselamatan PLTN serta fasilitas nuklir (TKPFN) VI*.
45. **Aziz, F.**, & Rivai, A. K. (2002). Analisis unjuk kerja fisika teras reaktor cepat modular berpendingin timbal-bismuth. Dalam *Lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir XIII*.
46. Lasman, A. N., **Aziz, F.**, & Rivai, A. K. (2002). Desain neutronik teras experimental power reactor. Dalam *Seminar nasional teknologi dan keselamatan PLTN serta fasilitas nuklir ke-8*.
47. **Aziz, F.**, & Rivai, A. K. (2002). Analisis desain perangkat subkritis berbahan bakar cair. Dalam *Seminar teknologi dan keselamatan PLTN serta fasilitas nuklir ke-7* (188–199).

48. **Aziz, F., & Lasman, A. N.** (2001). Analisis pasca-kritikalitas pertama reaktor temperatur tinggi HTR-10 China. Dalam *Lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir XII*.
49. **Aziz, F.** (2000). Analisis perhitungan benchmark kritikalitas pertama teras HTR-10. Dalam *Seminar RTT ke-5*.
50. **Aziz, F.** (2000). Perhitungan benchmark nilai reaktivitas elemen kendali reaktor temperatur tinggi HTR-10. Dalam *Lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir XI*.
51. **Aziz, F., & Lasman, A. N.** (2000). Teknologi dan keselamatan PLTN berwawasan lingkungan untuk menunjang pembangunan berkelanjutan. Dalam *Seminar nasional teknologi dan keselamatan PLTN serta fasilitas nuklir (TKPFN) VI*.
52. **Aziz, F., & Marsodi.** (1999). Perhitungan akumulasi limbah nuklir dan potensi pemanfaatan accelerator driven system untuk mengatasinya. Dalam *Lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir X*.
53. Suwoto, Zuhair, & **Aziz, F.** (1999). Analisis data tampang lintang total minima nitrogen-14 file data nuklir JENDL-3.2. Dalam *PPI P3TM*.
54. **Aziz, F.** (1998). Studi pemanfaatan PWR untuk mengeliminasi beberapa elemen aktivitas tinggi. Dalam *Lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir VIII*.
55. **Aziz, F.** (1998). Karakterisasi PWR pembakar untuk mengeliminasi neptunium dan americium. Dalam *Pertemuan dan presentasi ilmiah penelitian dasar ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir*.
56. **Aziz, F.** (1997). Penggunaan SRAC-EWS untuk perhitungan neutronik teras coupled spectrum reactor. Dalam *Lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir VII*.
57. **Aziz, F.** (1993). Simulasi teknik spektroskopi hamburan gamm a diferensial untuk mendeteksi cacat pada tangki aluminium. Dalam *Pertemuan dan presentasi ilmiah penelitian dasar ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir* (13–17).

58. **Aziz, F.** & Hamzah, A. (1993). Simulasi pencacahan sinar gamma dengan detektor sodium iodida menggunakan model sederhana. Dalam *Lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir IV* (239–247).
59. **Aziz, F.**, & Santoso B. (1993). Penggunaan paket program 3DB untuk desain dan analisis neutronik tiga dimensional teras reaktor. Dalam *Lokakarya komputasi dalam sains dan teknologi nuklir IV* (248–256).
60. **Aziz, F.**, & Jujuratisbela, U. (1987). Penentuan reaktivitas lebih pada teras pertama RSG GA Siwabessy. Dalam *Seminar teknologi daur bahan bakar dan keselamatan nuklir* (107–115).
61. Jujuratisbela, U., & **Aziz, F.** (1987). Eksperimen fisika reaktor dalam tahap awal komisioning nuklir RSG GA Siwabessy. Dalam *Seminar Teknologi daur bahan bakar dan keselamatan nuklir* (171–178).
62. Jujuratisbela, U., & **Aziz, F.** (1987). Pengukuran nilai reaktivitas batang pengatur reaktor RSG GA Siwabessy dengan metode Rod Drop. Dalam *Seminar Teknologi daur bahan bakar dan keselamatan nuklir*.
63. Jujuratisbela, U., & **Aziz, F.** (1987). Penggunaan metode unfolding dalam spektrometri neutron. Dalam *Pertemuan dan presentasi ilmiah penelitian dasar ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir* (556–576).
64. **Aziz, F.** (1986). Analisis neutronik desain teras reaktor uji material benchmark. Dalam *Seminar teknologi reaktor dan pusat listrik tenaga nuklir* (301–307).

Paten

65. Syarif, Soentono, S., Sudjatmoko, Anggraita, P., Sutondo, T., Budisantoso, E. T., & **Aziz, F.** (2013). *Perangkat reaktor subkritik untuk memproduksi Mo-99* (Nomor Paten IDP000034511). Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual.

DAFTAR PUBLIKASI LAINNYA

1. **Aziz, F.** (2010, 29 November). How safe is nuclear power for Indonesia? *The Jakarta Post*, A5–A6.
2. **Aziz, F.** (2000). Memboyong reaktor temperatur tinggi. *Majalah Teknologi*, Oktober.
3. **Aziz, F.** (2000). GT-MHR reaktor pemusnah plutonium bekas senjata nuklir. *Majalah Teknologi*, Juni.
4. **Aziz, F.** (1999). ADS konsep PLTN masa depan. *Majalah Teknologi*, Mei.
5. **Aziz, F.** (1994). ABWR, Hasil sebuah evolusi teknologi. *Majalah Teknologi*, April–Mei.
6. Mulyanto, & **Aziz, F.** (1994). Disposisi plutonium bekas hulu ledak nuklir dan manajemen limbah radioaktif aktivitas tinggi. *Majalah Ilmiah Fusi*, 2(1/2), 22–31.
7. **Aziz, F.** (1994). Memanfaatkan plutonium bekas senjata nuklir. *Majalah Teknologi*, Januari–Februari.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. Data Pribadi

Nama Lengkap	:	Dr. Ferhat Aziz, M.Sc.
Tempat, Tanggal Lahir	:	Bengkulu, 10 November 1958
Anak ke	:	8 dari 11 bersaudara
Nama Ayah Kandung	:	K.H. Abdul Aziz Masyhur
Nama Ibu Kandung	:	Marhamah Mahzan
Nama Istri	:	Dra. Diah Kusumawati
Jumlah Anak	:	4 orang
Nama Anak	:	(1) Nadia Ihsana Ferhat (2) Firman Imaduddin (3) Farid Azzeddin (4) Fadli Azzeddin
Nama Instansi	:	Badan Riset dan Inovasi Nasional
Judul Orasi	:	Pemanfaatan Pemodelan dan Simulasi Berbasis Komputasi dalam Pengembangan Reaktor Nuklir
Bidang Kepakaran	:	Aplikasi Energi Nuklir
No. SK Pangkat Terakhir	:	107/K Tahun 2014 tanggal 19 November 2014
No. SK Peneliti Ahli Utama	:	49/M Tahun 2018 tanggal 24 September 2018
No. SK Peneliti Ahli Utama BRIN	:	3/M Tahun 2022 tanggal 19 Januari 2022

B. Pendidikan Formal

No.	Jenjang	Nama Sekolah/PT/ Universitas	Tempat/Kota	Tahun Lulus
1.	SD	SD Negeri No. 47	Palembang	1970
2.	SMP	SMP Xaverius III	Palembang	1973
3.	SMA	SMA Xaverius I	Palembang	1976
4.	S-1	Universitas Indonesia	Jakarta	1982
5.	S-2	Quaid-e-Azam University	Islamabad, Pakistan	1986
6.	S-2	North Carolina State University	Raleigh, North Carolina, Amerika Serikat	1992
7.	S-3	Tokyo Institute of Technology	Tokyo, Jepang	1996

C. Pendidikan Nonformal

No.	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
1.	Kursus Penggunaan Fortran IV dan Aplikasi Komputer	Jakarta	1983
2.	Kursus In-Core Fuel Management	Jakarta	1986
3.	Kursus Operasi Reaktor Penelitian	Bandung	1991
4.	BATAN-AECL Workshop on CANDU Overview	Jakarta	1997

No.	Nama Pelatihan/ Pendidikan	Tempat/Kota/ Negara	Tahun
5.	STA Scientific Exchange Program on Evaluation of HTGCR Core Performance	Oarai, Jepang	1999
6.	Workshop on Status of High-Temperature Gas-cooled Reactor (HTGR) Technology	Trieste, Italia	2003
7.	Workshop on Safety Demonstration and User Requirements for High-Temperature Gas-Cooled Reactors	Beijing, Tiongkok	2004
8.	IAEA Scientific Visit and Training on Role of Nuclear Power Plant for National Development	Slovenia dan Kroasia	2010

D. Jabatan Struktural

No.	Jabatan/Pekerjaan	Nama Instansi	Tahun
1.	Kepala Subbidang Optimasi dan Sistem Pengendalian	Pusat Pengembangan Informatika, BATAN	Januari–September 1993
2.	Kepala Bidang Teknologi Reaktor Maju	Pusat Pengembangan Sistem Reaktor Maju, BATAN	1999–2006
3.	Kepala Biro Kerja Sama Hukum dan Hubungan Masyarakat	BATAN	2006–2012

No.	Jabatan/Pekerjaan	Nama Instansi	Tahun
4.	Deputi Bidang Pendayagunaan Hasil Litbang dan Perekayasaan Nuklir	BATAN	2012–2013
5.	Deputi Bidang Pengembangan Teknologi Daur Bahan Nuklir dan Rekayasa	BATAN	2013–2014
6.	Deputi Bidang Sains dan Aplikasi Teknologi Nuklir	BATAN	2014–2016

E. Jabatan Fungsional

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1.	Peneliti Ahli Muda (III/d)	1 Januari 1999
2.	Peneliti Ahli Madya (IV/b)	1 Februari 2003
3.	Peneliti Ahli Madya (IV/c)	1 Mei 2005
4.	Peneliti Ahli Utama (IV/d)	5 Oktober 2018
5.	Peneliti Ahli Utama BRIN	1 Oktober 2021

F. Penugasan Khusus Nasional/Internasional

No.	Jabatan	Pemberi Tugas	Tahun
1.	IAEA TC National Liaison Official (NLO)	BATAN	2006–2012
2.	IAEA General Conference Indonesian Delegates	BATAN	2006–2014
3.	Forum on Nuclear Cooperation (FNCA) National Coordinator	BATAN	2013–2014
4.	IAEA-RCA National Representative	BATAN	2014–2016

G. Keikutsertaan dalam Kegiatan Ilmiah

No.	Nama Kegiatan	Peran/Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
1.	Atom '94 Seminar	Peserta	Tokyo, Jepang	1994
2.	PPI-Jepang Seminar	Peserta	Tokyo, Jepang	1995
3.	AESJ-Annual/Fall Meeting	Peserta	Sendai, Jepang	1996
4.	CRP-5 Technical Meeting 1 on HTG-CR Core Evaluation	Peserta	Beijing, Tiongkok	1999
5.	CRP-5 Technical Meeting 2 on HTG-CR Core Evaluation	Peserta	Wina, Austria	2002
6.	CRP-5 Technical Meeting 3 on HTG-CR Core Evaluation	Peserta	Oarai, Jepang	2003

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
7.	IAEA CRP Research Coordination Meeting on HTGCR Performance	Peserta	Wina, Austria	2005
8.	IAEA General Conference: Scientific Forum	Peserta	Wina, Austria	2006
9.	IAEA Scientific Forum 2008: The Future Role of the IAEA	Peserta	Wina, Austria	2008
10.	IAEA INPRO Meeting	Peserta	Wina, Austria	2009
11.	RCA Research Coordination Meeting	Peserta	Christchurch, Selandia Baru	2011
12.	The 14th FNCA Coordinators Meeting	Peserta	Tokyo, Jepang	2013
13.	IAEA GC Side Event: Indonesia's Experience on Security Culture	Pembicara	Wina, Austria	2014
14.	RCA 38th Regional Meeting	Peserta	Ulaanbaatar, Mongolia	2016

Buku ini tidak diperjualbelikan.

H. Keterlibatan dalam Pengelolaan Jurnal Ilmiah

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/ Tugas	Tahun
1.	Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Keselamatan PLTN	BATAN	Editor	2000–2005
2.	Prosiding Lokakarya Komputasi dalam Sains dan Teknologi Nuklir	BATAN	Editor	2000–2006
3.	<i>Malaysian Journal of Fundamental and Applied Sciences</i> (MJFAS)	UTM, Malaysia	<i>Reviewer</i>	2018
4.	<i>Atom Indonesia</i>	BRIN	<i>Reviewer</i>	2017, 2021–2023

I. Karya Tulis Ilmiah

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Penulis Tunggal	9
2.	Bersama Penulis Lainnya	56
	Total	65

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	33
2.	Bahasa Inggris	32
	Total	65

J. Pembinaan Kader Ilmiah

Pejabat Fungsional Peneliti

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Dr. Mardiyanto	BRIN	Pembimbing penelitian	2018–sekarang
2.	Drs. Parikin, M.Eng.	BRIN	Pembimbing penelitian	2018–sekarang
3.	Nanda Sabrina, S.Si., M.Si.	BRIN	Pembimbing penelitian	2018–sekarang
4.	Diene Noor Haerani, A.Md.Si	BRIN	Pembimbing penelitian	2021–sekarang
5.	Dra. Elfrida Saragi, M.Si.	BRIN	Pembimbing penelitian	2022–sekarang
6.	Ir. Andryansyah, M.T.	BRIN	Pembimbing penelitian	2022–sekarang

Mahasiswa

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
1.	Abu K. Rivai	ITB	Pembimbing skripsi	2001
2.	Sidik Permana	ITB	Pembimbing skripsi	2001
3.	Jauringkang Tabah	UGM	Pembimbing skripsi	2003
4.	M. Ali	IPB	Pembimbing skripsi	2004

No.	Nama	Instansi	Peran/Tugas	Tahun
5.	Yanti Yulianti	ITB	Penguji Disertasi	2010
6.	Marsodi	Bapeten	Penguji Disertasi	2012
7.	Wanda Feri Rezki	Universitas Andalas	Pembimbing skripsi	2019
8.	Miswan	Universitas Pamulang	Pembimbing Tesis	2023
9.	Tantyo Aji Suwanda	Universitas Pamulang	Pembimbing Tesis	2023
10.	Jamiatul Khoiryah	Universitas Pamulang	Pembimbing Tesis	2023

K. Organisasi Profesi

No.	Jabatan	Nama Organisasi	Tahun
1.	Anggota	Himpunan Fisika Indonesia	1982–sekarang
2.	Anggota	Himpunan Masyarakat Nuklir Indonesia	2010–sekarang
3.	Anggota	Perkumpulan Masyarakat Riset Material-Indonesia	2017–sekarang
4.	Anggota	Himpunan Peneliti Indonesia	2019–sekarang

L. Tanda Penghargaan

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	Satyalancana Karya Satya X Tahun	Presiden Republik Indonesia	1992
2.	Satyalancana Karya Satya XX Tahun	Presiden Republik Indonesia	2002
3.	Satyalancana Karya Satya XXX Tahun	Presiden Republik Indonesia	2012

PEMANFAATAN PEMODELAN DAN SIMULASI BERBASIS KOMPUTASI DALAM PENGEMBANGAN REAKTOR NUKLIR

Sebagai negara berpenduduk besar, Indonesia memerlukan sumber energi yang besar pula. PLTN yang telah banyak dimanfaatkan negara maju mampu menghasilkan listrik secara efisien sehingga dapat diandalkan untuk memenuhi kebutuhan listrik negara ini. Dengan emisi yang jauh lebih sedikit dibanding sumber energi fosil, penggunaan PLTN dapat mendukung upaya pencapaian target *net-zero emission* (NZE) pada 2060. Oleh karena itu, penguasaan iptek nuklir harus digiatkan, salah satunya, dengan peningkatan kemampuan dalam pemanfaatan pemodelan dan simulasi berbasis komputasi yang dapat melengkapi pengembangan teori ilmiah dan eksperimen di laboratorium secara lebih akurat, aman, dan selamat.

Orasi ini menerangkan bahwa pemanfaatan pemodelan dan simulasi berbasis komputasi dapat membantu para pelaku pengembangan iptek reaktor nuklir mendapatkan hasil kegiatannya. Salah satu pemanfaatan tersebut adalah konsep desain reaktor inovatif pembakar limbah nuklir via proses fisi dan transmudasi. Hasil simulasi penulis menunjukkan bahwa satu unit konsep reaktor ini dapat membakar limbah nuklir dengan efisien. Dengan demikian, kemampuan dalam pemodelan dan simulasi berbasis komputasi untuk pengembangan reaktor nuklir diharapkan menjadi modal penting bagi upaya pencapaian target NZE melalui pemanfaatan PLTN. Selanjutnya, pengembangan reaktor nuklir lanjutan pada era Industri 4.0 diperlukan dengan lebih memanfaatkan perkembangan teknologi informasi, seperti AI, khususnya *generative AI*, dalam rangka memperkuat kesiapan Indonesia menyongsong era PLTN.



BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, Anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie Lt. 8, Jl. M.H. Thamrin No. 8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: +62 811-1064-6770
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.874



ISBN 978-623-8372-08-9



9 786238 137208 9

Buku ini tidak diperjualbelikan.