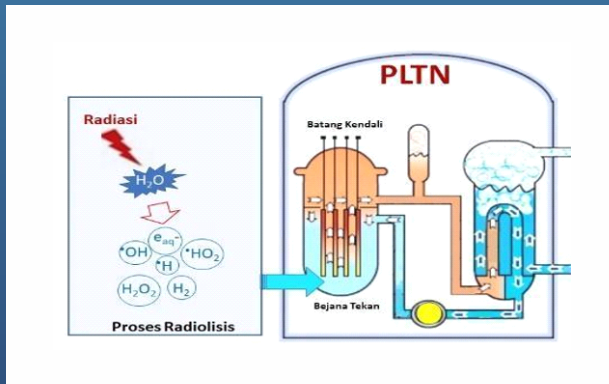


ORASI ILMIAH: RISET DAN INOVASI

TATA KELOLA KIMIA PENDINGIN REAKTOR NUKLIR MENUJU ERA PLTN UNTUK KEMANDIRIAN ENERGI DI INDONESIA

ORASI ILMIAH PROFESOR RISET
ILMU TEKNIK NUKLIR,
BIDANG KIMIA SISTEM PENDINGIN REAKTOR
KEPAKARAN INTEGRASI RADIOLISIS, KOROSI
MATERIAL, DAN SISTEM KIMIA PREDIKTIF
DALAM KESELAMATAN REAKTOR NUKLIR



GENI RINA SUNARYO

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL

**TATA KELOLA KIMIA PENDINGIN
REAKTOR NUKLIR
MENUJU ERA PLTN UNTUK
KEMANDIRIAN ENERGI DI INDONESIA**

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Diterbitkan pertama pada 2026 oleh Penerbit BRIN

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



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International (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/>



**TATA KELOLA KIMIA PENDINGIN
REAKTOR NUKLIR
MENUJU ERA PLTN UNTUK
KEMANDIRIAN ENERGI DI INDONESIA**

**ORASI ILMIAH PROFESOR RISET
ILMU TEKNIK NUKLIR,
BIDANG KIMIA SISTEM PENDINGIN REAKTOR
KEPAKARAN INTEGRASI RADIOLISIS, KOROSI
MATERIAL, DAN SISTEM KIMIA PREDIKTIF
DALAM KESELAMATAN REAKTOR NUKLIR**

**OLEH:
GENI RINA SUNARYO**

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2026 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir – Organisasi Riset Tenaga Nuklir

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Tata Kelola Kimia Pendingin Reaktor Nuklir Menuju Era PLTN untuk Kemandirian Energi di Indonesia/Geni Rina Sunaryo-Jakarta: Penerbit BRIN, 2026.

xvi + 93 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISSN 3090-8485

- | | |
|--|-------------------------------|
| 1. Kimia pendingin reaktor | 2. Keselamatan reaktor nuklir |
| 3. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) | 4. Radiolisis air |

621.483

Copy editor : Meita Safitri
Proofreader : Meita Safitri
Penata Isi : Meita Safitri
Desainer Sampul : Meita Safitri

Edisi pertama : Juli 2026



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.

UCAPAN TERIMA KASIH	49
DAFTAR PUSTAKA.....	53
DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI.....	61
DAFTAR RIWAYAT HIDUP	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 4.1	Pengaruh temperatur terhadap nilai-G spesies radiolisis hasil iradiasi.....	30
Gambar 4.2	Pola XRD baja karbon setelah perendaman selama empat tahun dalam air pendingin yang mengandung inhibitor. Perbandingan tersebut menunjukkan pengaruh orientasi kupon dan konfigurasi galvanik terhadap pembentukan produk korosi.....	32
Gambar 4.3	Lokasi fokus pengamatan mikroskopik/SEM pada permukaan paduan AlMg ₂ setelah 15 tahun perendaman dalam air pendingin primer RSG-GAS. Area pengamatan menunjukkan fitur lokal berupa permukaan kasar (<i>rough surface</i>), lubang kecil atau sumuran dangkal (<i>small hole</i>), dan endapan putih (<i>white deposit</i>).....	33
Gambar 4.4	Hasil simulasi kemampuan <i>Helium Purification System</i> (HPS) dalam memurnikan campuran helium-uap air pada skenario <i>Design Basis Accident</i> (DBA) dan <i>Beyond Design Basis Accident</i> (BDBA).....	35
Gambar 5.1	Kerangka Diagram Integratif Keselamatan Kimia Reaktor sebagai Fondasi Strategis Pengembangan Reaktor Daya dan SMR.....	39

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Strategi Pengelolaan Kimia Pendingin Reaktor oleh Negara-Negara Utama.....	14
Tabel 2.2 Sistem Pengelolaan Kimia Pendingin dalam Teknologi Reaktor Nuklir	19
Tabel 4.1 Ringkasan Kontribusi Individual dalam Pengembangan Kimia Pendingin Reaktor	36

Buku ini tidak diperjualbelikan.

BIODATA RINGKAS



Dr. Geni Rina Sunaryo, M.Sc., lahir di Jakarta, pada tanggal 9 September 1962 adalah anak pertama dari Bapak Srinindyat Soenaryo dan Ibu Suswarinah. Menikah dengan Prof. Dr. Djarot Sulistio Wisnubroto dan dikaruniai satu orang anak, yaitu Pandu Wisesa Wisnubroto, S.H.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor No. 39/M tahun 2020, tanggal 6 Mei 2020, yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama terhitung mulai 6 Mei 2020.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional Nomor 165/I/HK/2026 tanggal 14 Juli 2026 yang bersangkutan dapat melakukan orasi ilmiah dan dikukuhkan menjadi Profesor Riset.

Menyelesaikan pendidikan dasar dan menengah di Yayasan Perguruan Cikini Jakarta (SD 1974, SMP 1977) dan SMA Negeri 4 Jakarta (1981). Meraih gelar Sarjana Analisis Kimia dari Akademi Kimia Analisis Bogor (1984), Magister di bidang Nuclear Engineering (1990), dan Doktor di bidang Application Radiation Chemistry (1994) dari Tokyo University, Jepang.

Telah mengikuti berbagai pelatihan dan riset internasional yang mendukung kompetensinya di bidang keselamatan reaktor dan kimia radiasi, antara lain pelatihan radiolisis air bersuhu tinggi sebagai STA Scientist di JAERI, Jepang (2000–2001), dua program postdoktoral terkait simulasi Monte Carlo kimia

radiasi di Kanada (2005) dan radiolisis pendingin superkritis di CRIEPI Jepang (2006), serta pelatihan manajemen kualitas air reaktor di Slovenia (2007). Juga aktif dalam berbagai workshop IAEA dan BATAN terkait pengelolaan umur reaktor dan inspeksi keselamatan (1996–2004). Untuk mendukung kapasitas kepemimpinan, mengikuti Diklatpim II Angkatan XLI tahun 2015.

Pernah menduduki sejumlah jabatan struktural strategis, antara lain sebagai Kepala Subbagian Ilmiah dan Dokumentasi (1999–2001), Kepala Subbidang Keandalan Sistem (2001–2004), Kepala Bidang Teknologi Keselamatan Reaktor (2013–2014), dan Kepala Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor (2014–2020).

Jabatan fungsional peneliti dimulai sebagai Peneliti Muda tahun 1995, kemudian naik menjadi Peneliti Madya tahun 2001. Setelah menyelesaikan postdoktoral pada 2006, diaktifkan kembali sebagai Peneliti Madya, dan dilanjutkan sebagai Peneliti Utama tahun 2012. Usai menjabat dalam posisi struktural pada 2017–2020, kembali aktif sebagai Peneliti Ahli Utama tahun 2020 di bidang keselamatan reaktor nuklir, dan mencapai jenjang tertinggi sebagai Ahli Peneliti Utama tahun 2024.

Menghasilkan 125 karya tulis ilmiah, baik sebagai penulis tunggal maupun bersama tim, yang diterbitkan dalam bentuk buku, jurnal, dan prosiding. Dari jumlah tersebut, 113 ditulis dalam bahasa Inggris, 12 dalam bahasa Indonesia, serta tesis magister dan disertasi doktor ditulis dalam bahasa Jepang.

Aktif dalam pembinaan kader ilmiah dan pengembangan teknologi reaktor, antara lain sebagai pembimbing jabatan fungsional peneliti dan Anggota Dewan Penilai Peneliti BATAN (2010–2013), serta Peneliti Utama di bidang keselamatan reaktor nuklir. Terlibat dalam kerja sama internasional di bawah

koordinasi IAEA (1995–1998), termasuk sebagai Anggota Technical Group HTGR IAEA (2017–2019). Memimpin sejumlah program strategis, seperti Ketua Tim Desain Reaktor Daya Eksperimental (2015–2019), Kepala Program Flagship Desain HTGR 10 MW (2018–2019), serta Ketua Project Joint Lab BATAN–Tsinghua University (2018–2020). Juga menjabat sebagai Penanggung Jawab Budaya Keselamatan BATAN dan Ketua Tim Keselamatan Reaktor RSG-GAS (2014–2019), serta Koordinator Desain Reaktor Berbahan Bakar Plutonium (2014–2017). Saat ini memimpin kelompok riset Keandalan Sistem Pendingin dan Rekayasa Proses Reaktor BRIN (2022) dan menjadi Anggota TP2U PRTRN BRIN (2023–2025). Selain itu, aktif sebagai pembicara dalam berbagai forum nasional dan internasional, termasuk sebagai dosen tamu di *National Centre for Nuclear Research*, Polandia, dan narasumber di berbagai webinar BRIN dan HIMNI. Juga membimbing tugas akhir tingkat sarjana di Sekolah Tinggi Teknologi Nuklir, tesis magister di Universitas Indonesia dan IPB, serta disertasi doktor di UI dan IPB.

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, antara lain sebagai anggota Himpunan Peneliti Indonesia (HIMPENINDO) periode 2017–2021, Persatuan Peneliti Indonesia (PPI) periode 2021–2025, Ketua Divisi Pengembangan Perempuan Nuklir Indonesia dari Himpunan Masyarakat Nuklir Indonesia (HIMNI) periode 2021–2025, serta Ketua International Council for *Women in Technology and Industry* (ICWITI) periode 2024–2025.

Menerima tanda penghargaan Satya Lencana Karya Satya 10 tahun (1997), 20 tahun (2007), dan 30 tahun (2017) dari Presiden Republik Indonesia, serta dianugerahi penghargaan sebagai Tokoh Nuklir Indonesia oleh Lembaga Kajian Nawacita (LKN) pada tahun 2023.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillaahirrahmaanirrahiim.

Assalaamu'alaikum warahmatullaahi wabarakaatuh.

Salam sejahtera untuk kita semua.

Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Kepala Instansi yang mulia dan hadirin yang saya hormati.

Pertama-tama marilah kita panjatkan puji dan syukur ke hadirat 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.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya pada tanggal (tanggal/bulan/tahun orasi dilaksanakan) menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

“TATA KELOLA KIMIA PENDINGIN
REAKTOR NUKLIR
MENUJU ERA PLTN UNTUK KEMANDIRIAN
ENERGI DI INDONESIA ”

Pada Orasi ini akan disampaikan *state of the art* tentang kimia pendingin reaktor, mencakup pemahaman fundamental radiolisis air, dinamika spesies kimia dalam lingkungan radiasi, serta implikasinya terhadap degradasi material dan keandalan sistem reaktor. Selain itu, akan dibahas pula peluang dan tantangan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

pengembangan pengelolaan kimia pendingin dalam mendukung keselamatan reaktor generasi lanjut, termasuk transformasi menuju sistem pemantauan berbasis AI dan pendekatan prediktif yang adaptif terhadap kondisi operasional.

Orasi ini diharapkan dapat memperkuat fondasi ilmiah keselamatan reaktor, serta mendorong kesiapan teknologi nuklir nasional dalam menjawab tantangan transisi energi yang aman, bersih, dan berkelanjutan.

I. PENDAHULUAN

Lebih dari tiga dekade yang lalu, di kolam reaktor riset University of Tokyo, saya menyaksikan cahaya biru Cerenkov yang muncul dari interaksi radiasi dengan medium air. Pengalaman tersebut menjadi titik awal pemahaman bahwa air dalam sistem pendingin reaktor bukan sekadar fluida perpindahan panas, melainkan suatu sistem kimia dinamis yang terus bereaksi di bawah pengaruh radiasi, temperatur tinggi, dan interaksi dengan material struktural reaktor.

Sejak saat itu, saya menekuni bidang kimia pendingin reaktor sebagai bagian fundamental dari keselamatan reaktor nuklir. Perjalanan penelitian tersebut berkembang dari studi radiolisis air suhu tinggi menuju pemahaman yang lebih integratif mengenai degradasi material, kestabilan kimia pendingin, dan pengembangan sistem keselamatan reaktor berbasis pendekatan prediktif (Sunaryo et al., 1994; Sunaryo et al., 1995a; Sunaryo et al., 1995b).

Perkembangan kebutuhan energi global, keterbatasan sumber energi fosil, serta tuntutan penurunan emisi karbon telah mendorong berbagai negara untuk mengembangkan sumber energi yang bersih, andal, dan berkelanjutan. Dalam konteks ini, energi nuklir kembali memperoleh perhatian sebagai salah satu opsi strategis dalam transisi energi global, terutama melalui pengembangan reaktor generasi lanjut yang lebih aman, efisien, fleksibel, dan adaptif, termasuk *Small Modular Reactor* (SMR).

Pada era reaktor generasi lanjut, tantangan keselamatan tidak lagi hanya bertumpu pada aspek neutronik, termohidraulika, dan desain mekanik, tetapi juga pada kemampuan sistem dalam

mempertahankan kestabilan kimia pendingin secara *real-time*. Kompleksitas interaksi antara radiolisis, korosi material, produk aktivasi, transport radionuklida, dan dinamika operasi menunjukkan bahwa pendekatan konvensional berbasis inspeksi berkala dan parameter statis tidak lagi memadai. Sistem reaktor masa depan memerlukan pendekatan keselamatan yang lebih prediktif, adaptif, terdigitalisasi, dan berbasis data.

Indonesia memiliki posisi strategis dalam mendukung transisi menuju sistem energi rendah karbon melalui penguasaan teknologi nuklir yang telah dibangun selama beberapa dekade. Pengoperasian reaktor riset seperti Reaktor Serba Guna Siwabessy (RSG-GAS) 30 MW di Serpong, *Training, Research, Isotopes, General Atomics* 2000 kW (TRIGA 2000) di Bandung, dan Reaktor Kartini di Yogyakarta 100 kW yang merupakan reaktor riset tipe TRIGA Mark II, menunjukkan bahwa Indonesia telah memiliki pengalaman teknis, sumber daya manusia, serta infrastruktur kelembagaan dalam bidang teknologi reaktor nuklir. Rekam jejak tersebut menjadi fondasi penting dalam mendukung pengembangan Reaktor Daya Eksperimental (RDE) dan membuka peluang implementasi Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN), termasuk SMR, di masa depan.

Pengalaman operasi jangka panjang reaktor riset di Indonesia juga memberikan nilai ilmiah yang penting, khususnya dalam membangun basis data mengenai degradasi material dan dinamika kimia pendingin pada lingkungan tropis (Sunaryo et al., 2021; Sunaryo et al., 2024; Sunaryo et al., 2025). Kontribusi ini menjadi relevan karena sebagian besar data internasional mengenai perilaku material dan kimia pendingin reaktor masih didominasi oleh kondisi operasi di lingkungan subtropis dan beriklim sedang. Dengan demikian, pengalaman Indonesia tidak hanya memiliki nilai strategis dalam aspek penguasaan teknologi,

tetapi juga memberikan kontribusi ilmiah bagi pengembangan keselamatan reaktor nuklir di kawasan tropis.

Keberhasilan pengembangan teknologi reaktor tidak hanya ditentukan oleh desain inti reaktor, tetapi juga oleh keandalan sistem pendukungnya. Dalam hal ini, sistem pendingin reaktor memegang peranan krusial, tidak hanya dalam menjaga kestabilan temperatur, tetapi juga dalam mengendalikan proses kimia yang memengaruhi degradasi material, korosi, pembentukan produk aktivasi, serta transport radionuklida yang berpotensi meningkatkan paparan radiasi.

Meskipun pengelolaan kimia pendingin telah lama diterapkan dalam operasi reaktor, sebagian besar pendekatan masih bersifat korektif dan berbasis parameter statis, seperti pH, konduktivitas, oksigen terlarut, serta inspeksi berkala. Pendekatan tersebut belum sepenuhnya mampu menggambarkan dinamika radiolisis, degradasi material, dan perubahan kimia sistem secara spasial-temporal dalam kondisi operasi nyata (Sunaryo & Domae, 2008; Sunaryo et al., 2011; Butarbutar et al., 2014). Selain itu, keterbatasan data primer dari lingkungan tropis menunjukkan perlunya pengembangan pendekatan baru yang mampu mengintegrasikan data radiolisis, korosi, pemantauan daring, dan analitik prediktif ke dalam satu kerangka keselamatan reaktor berbasis data.

Dalam konteks tersebut, penelitian yang saya lakukan selama lebih dari tiga dekade diarahkan untuk menggeser paradigma pengelolaan kimia pendingin dari pendekatan reaktif menuju pendekatan prediktif dan adaptif. Rangkaian penelitian ini mencakup kajian radiolisis air suhu tinggi, validasi kinetika reaksi spesies kimia hasil radiolisis, interaksi kimia dengan material struktural reaktor, serta pengembangan pendekatan prediktif dalam pengelolaan sistem pendingin.

Berdasarkan rangkaian penelitian tersebut, saya merumuskan konsep *predictive coolant chemistry* sebagai paradigma baru dalam keselamatan kimia reaktor. Konsep ini mengintegrasikan pemahaman radiolisis, degradasi material, pemantauan daring, analitik data, dan sistem prediktif berbasis kecerdasan buatan (AI) untuk mendukung pengelolaan kimia pendingin secara lebih adaptif dan responsif terhadap perubahan kondisi operasi (Sunaryo et al., 2021; Bakhri et al., 2018; Hartini et al., 2022).

Rangkaian penelitian tersebut menghasilkan tiga kontribusi ilmiah utama. Pertama, diperolehnya data primer radiolisis air pada kondisi suhu tinggi dan iradiasi neutron yang relevan dengan kondisi operasi reaktor. Kedua, dilakukannya validasi kinetika reaksi spesies kimia hasil radiolisis sebagai dasar pemodelan perilaku kimia pendingin. Ketiga, dibangunnya basis data degradasi material jangka panjang pada sistem pendingin reaktor di lingkungan tropis Indonesia. Ketiga kontribusi ini memperkuat pemahaman fundamental mengenai dinamika kimia pendingin reaktor sekaligus membentuk landasan ilmiah bagi pengembangan sistem keselamatan reaktor berbasis *predictive monitoring*, kecerdasan buatan, dan *digital twin*.

Untuk memberikan alur pembahasan yang sistematis, orasi ini disusun dalam tujuh bab yang saling terhubung. Bab I merupakan pendahuluan yang menguraikan latar belakang ilmiah, konteks transisi energi, posisi strategis teknologi nuklir, serta urgensi pengembangan tata kelola kimia pendingin reaktor sebagai bagian dari keselamatan reaktor nuklir. Bab II menyajikan perspektif pengembangan ilmu pengetahuan dan teknologi kimia pendingin reaktor, mulai dari sejarah dan transformasinya, inovasi terkini dalam pengelolaan kimia pendingin, hingga arah dan tantangan pengembangannya pada era reaktor generasi lanjut, PLTN, dan SMR.

Bab III menguraikan esensi atau sari pati karya ilmiah yang menjadi dasar kepakaran, terutama dalam radiolisis air, kinetika reaksi spesies kimia, korosi dan penuaan material, serta pengembangan kerangka integratif keselamatan kimia reaktor. Bab IV memperdalam kontribusi ilmiah yang dihasilkan melalui penelitian fundamental, validasi eksperimental, pengembangan model kinetika, *predictive coolant chemistry*, pengendalian korosi, *aging management*, serta penerapan prinsip kimia pendingin pada sistem reaktor generasi lanjut dan aplikasi non-listrik.

Selanjutnya, Bab V membahas kontribusi umum dari karya ilmiah ini bagi penguatan kebijakan, regulasi, keselamatan, kemandirian teknologi, pengembangan sumber daya manusia, industri pendukung, serta peningkatan kepercayaan publik terhadap pemanfaatan energi nuklir di Indonesia. Bab VI merangkum kesimpulan utama orasi, terutama mengenai peran strategis kimia pendingin sebagai fondasi keselamatan reaktor dan kesiapan nasional menuju era PLTN. Akhirnya, Bab VII menjadi penutup yang menegaskan makna ilmiah, strategis, dan kebangsaan dari penguasaan kimia pendingin reaktor sebagai bagian dari upaya membangun keselamatan nuklir, kemandirian teknologi, dan ketahanan energi Indonesia.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

II. PERSPEKTIF PENGEMBANGAN IPTEK KIMIA PENDINGIN REAKTOR

Di tengah dinamika transisi energi global dan pengembangan reaktor generasi baru, pemahaman terhadap air sebagai medium dalam sistem pendingin reaktor menjadi semakin krusial. Di balik kejernihannya, air merupakan sistem kimia aktif yang dipengaruhi oleh interaksi radiasi, proses reaksi kimia, dan kondisi operasional reaktor. Dalam konteks ini, kimia pendingin yang sebelumnya dipandang sebagai aspek pendukung, kini berkembang menjadi fondasi utama dalam menjamin keselamatan, keandalan, dan umur panjang sistem nuklir.

A. Sejarah dan Transformasi Kimia Pendingin Reaktor

Ilmu kimia pendingin reaktor berkembang seiring dengan kemajuan teknologi nuklir sejak pertengahan abad ke-20. Pada tahap awal, sekitar periode 1950–1970, pengembangan reaktor masih didominasi oleh aspek termohidraulika, dengan fokus utama pada efisiensi perpindahan panas, kestabilan aliran fluida, dan keandalan sistem mekanik. Pada fase ini, sistem reaktor lebih banyak dipandang sebagai sistem fisik-mekanis, sehingga peran kimia belum sepenuhnya diposisikan sebagai faktor kritis dalam keselamatan. Kontribusi kimia masih terbatas pada pengendalian kualitas air untuk menjaga kejernihan, mencegah pembentukan kerak, dan mengurangi endapan dalam sistem pendingin (Shoji, 2010).

Seiring meningkatnya pengalaman operasi reaktor, keterbatasan pendekatan termohidraulika murni mulai terlihat. Berbagai fenomena degradasi material, korosi, ketidakstabilan redoks,

dan perubahan kimia fluida pendingin tidak dapat dijelaskan hanya melalui analisis mekanik dan perpindahan panas. Kondisi ini menjadi titik awal berkembangnya pendekatan multidisiplin yang mulai menempatkan kimia sebagai bagian penting dalam keselamatan reaktor.

Kesadaran tersebut semakin menguat pascakecelakaan *Three Mile Island* pada tahun 1979, yang menunjukkan bahwa produk radiolisis, seperti radikal hidroksil dan hidrogen peroksida, dapat berperan dalam mempercepat korosi material struktural (NRC, 1980; Pastina et al., 1999). Peristiwa Chernobyl pada tahun 1986 dan Fukushima Daiichi pada tahun 2011 semakin menegaskan bahwa air pendingin bukan sekadar fluida kerja, melainkan medium kimia aktif yang secara langsung memengaruhi keselamatan reaktor.

Studi pascakecelakaan menunjukkan bahwa ketidakseimbangan redoks serta akumulasi spesies radiolisis dapat mempercepat degradasi struktural dan meningkatkan mobilitas radionuklida (Saenko et al., 2011; Le Caër, 2011; Kinoshita et al., 2011). Dalam kondisi darurat, perubahan kimia air juga dapat memperluas penyebaran kontaminasi ke sistem sekunder dan lingkungan. Dengan demikian, kimia pendingin mulai dipahami sebagai bagian integral dari sistem pertahanan berlapis (*defense-in-depth*) dalam keselamatan reaktor.

Perkembangan ini mendorong pergeseran paradigma dari pendekatan termohidraulika menuju pendekatan multidisiplin yang menempatkan parameter kimia, seperti pH, konduktivitas, oksigen terlarut, hidrogen, hidrogen peroksida, serta spesies redoks, sebagai indikator penting dalam pengendalian keselamatan kimia sistem pendingin reaktor (Shoji, 2010; Balakrishnan et al., 2021). Pengelolaan kimia pendingin pun

berkembang dari sistem pasif dan korektif menuju sistem pemantauan aktif berbasis data dan analisis prediktif.

Riset global di bidang ini menunjukkan perkembangan yang pesat. Jepang melalui studi radiolisis suhu tinggi menghasilkan data nilai-G yang menjadi acuan penting dalam memahami pembentukan spesies radiolisis pada kondisi operasi reaktor (Katsumura et al., 1998). Di Swiss, Paul Scherrer Institute mengintegrasikan radiokimia dengan pemantauan korosi untuk mendukung keselamatan reaktor generasi lanjut. Di Amerika Serikat, ORNL dan EPRI mengembangkan strategi injeksi hidrogen dan zinc, serta sistem pemantauan daring yang banyak diterapkan pada *Pressurized Water Reactor* (PWR) dan *Boiling Water Reactor* (BWR) (Andresen et al., 2019; IAEA, 2020).

Di Asia Timur, pengembangan bergerak menuju sistem berbasis digital. Korea Selatan mengembangkan kontrol kimia berbasis sensor pintar, sedangkan Tiongkok mengintegrasikan kecerdasan buatan, pelapis nanomaterial, dan sistem pemantauan kimia pada reaktor modern seperti Hualong One dan HTR-PM. Indonesia sendiri mulai mengembangkan disiplin kimia radiasi air sejak pengoperasian reaktor riset, termasuk TRIGA, Kartini, dan RSG-GAS, yang kemudian menjadi fondasi penting bagi pengembangan pengalaman nasional dalam pengelolaan kimia pendingin reaktor.

Saat ini, pendekatan kimia telah menjadi salah satu pilar dalam desain sistem keselamatan aktif dan pasif PLTN generasi baru. Perannya mencakup pengendalian degradasi material, manajemen umur sistem (*lifetime extension*), optimasi efisiensi operasi, serta mitigasi pembentukan produk aktivasi. Transformasi digital semakin memperkuat fungsi tersebut. Sistem kimia pendingin tidak lagi hanya dipantau secara periodik, tetapi mulai dianalisis secara prediktif untuk mendukung pengambilan

keputusan keselamatan secara *real-time*. Électricité de France (EDF), misalnya, telah mengintegrasikan pemantauan kimia berbasis *Artificial Intelligence* (AI) dengan model neutronik dan termohidraulik untuk mendeteksi fluktuasi redoks dan memitigasi fenomena *Axial Offset Anomaly* (AOA) (Tibaoui et al., 2019; Shoji, 2010).

Pendekatan ini menempatkan kimia pendingin sebagai komponen utama dalam arsitektur keselamatan berbasis data (*data-driven safety*), khususnya dalam pengembangan SMR dan sistem operasi otonom (Beznosov et al., 2022). Dengan perkembangan tersebut, kimia pendingin telah bertransformasi dari fungsi pendukung menjadi fondasi strategis dalam pengelolaan keselamatan reaktor, baik untuk reaktor riset maupun PLTN masa depan.

Dalam lintasan perkembangan tersebut, kontribusi penelitian kimia pendingin reaktor di Indonesia perlu ditempatkan sebagai bagian dari upaya membangun basis ilmiah lokal. Pengalaman operasi reaktor riset, pengumpulan data radiolisis, pengendalian korosi, serta pengelolaan sistem pendingin di lingkungan tropis menjadi modal penting dalam memperkuat kesiapan nasional menuju era PLTN dan SMR. Dengan demikian, transformasi kimia pendingin reaktor tidak hanya merefleksikan perkembangan iptek global, tetapi juga menjadi landasan strategis bagi kemandirian keselamatan nuklir Indonesia.

B. Inovasi Terkini dalam Pengelolaan Kimia Pendingin Reaktor

Pengelolaan kimia pendingin dalam sistem reaktor nuklir telah mengalami transformasi signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Pendekatan yang semula bersifat korektif dan berbasis inspeksi berkala kini berkembang menjadi sistem yang lebih

prediktif, adaptif, dan berbasis kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence/AI*) (Tibaoui et al., 2019; Beznosov et al., 2022). Evolusi ini didorong oleh tuntutan peningkatan keselamatan, efisiensi pemeliharaan, perpanjangan umur operasi komponen, serta kebutuhan untuk mendeteksi potensi degradasi material secara lebih dini.

Secara global, berbagai strategi mutakhir telah diterapkan untuk menjaga stabilitas kimia air pendingin dan menekan dampak korosif spesies radiolisis. Injeksi hidrogen (*hydrogen injection*) dan injeksi zinc (*zinc injection*) menjadi dua pendekatan penting dalam pengendalian kimia pendingin reaktor air ringan. Hidrogen digunakan untuk menciptakan kondisi reduktif yang dapat menekan pembentukan oksidator seperti hidrogen peroksida, sedangkan zinc berperan dalam memperkuat lapisan pasif pelindung pada permukaan material, mengurangi pelepasan produk korosi, dan menurunkan paparan radiasi sekunder (Andresen et al., 2003; Lin, 2000; EPRI, 2006).

Selain pendekatan kimia, inovasi teknologi juga telah merevolusi sistem pemantauan reaktor. Integrasi AI, analitik data besar, sensor pintar, dan pemodelan radiolisis daring memungkinkan pemantauan kondisi kimia secara *real-time* dan lebih responsif terhadap perubahan operasi (Ardebili et al., 2021; Beznosov et al., 2022; IAEA TECDOC-1926). Pendekatan *predictive maintenance* memungkinkan deteksi dini degradasi komponen berdasarkan tren data operasi, sehingga ketergantungan pada inspeksi manual berkala dapat dikurangi.

Transformasi ini menggeser posisi kimia pendingin dari sekadar fungsi pendukung operasi menjadi elemen strategis dalam filosofi keselamatan reaktor. Kimia pendingin kini berperan dalam skema *defense-in-depth*, mendukung pengelolaan umur desain, mengurangi risiko degradasi material, serta menjadi faktor penting dalam kelayakan ekonomi jangka panjang PLTN.

Implementasi pendekatan tersebut telah berkembang di berbagai negara. Amerika Serikat mengintegrasikan injeksi hidrogen dan zinc dengan sistem pemantauan digital serta model korosi lanjut, termasuk dalam pengembangan SMR seperti NuScale (EPRI, 2020). Jepang mengembangkan kontrol kimia suhu tinggi dan pemantauan air superkritis yang didukung sensor robotik. Korea Selatan menerapkan sistem kontrol kimia berbasis sensor pintar dan diagnostik *real-time* pada APR1400 dan SMART SMR. Sementara itu, Tiongkok mengembangkan pendekatan terintegrasi melalui *Coolant Chemistry Monitoring System* (CCMS), platform digital *Instrumentation and Control* (I&C), pemantauan berbasis AI, serta penggunaan nanomaterial pada reaktor modern seperti Hualong One dan HTR-PM (Zhang et al., 2021; Park et al., 2022; Lee et al., 2021).

Untuk memperjelas arah perkembangan pengelolaan kimia pendingin reaktor di tingkat global, Tabel 2.1 menyajikan perbandingan strategi yang dikembangkan di beberapa negara utama beserta teknologi pendukungnya. Tabel tersebut tidak dimaksudkan sebagai kompilasi langsung dari satu dokumen resmi masing-masing negara, melainkan sebagai sintesis konseptual dari berbagai literatur mengenai pengelolaan kimia air reaktor, pengendalian korosi, pemantauan daring, sensor digital, kecerdasan buatan, dan sistem prediktif dalam keselamatan reaktor nuklir. Oleh karena itu, beberapa teknologi yang dicantumkan, seperti *AI predictive monitoring*, *smart sensor network*, *big data analytics*, *nano-coating*, dan *digital diagnostics*, perlu dipahami sebagai representasi arah pengembangan mutakhir yang belum tentu telah diterapkan secara seragam pada seluruh reaktor di negara terkait.

Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.1, terdapat kecenderungan yang semakin kuat bahwa pengelolaan kimia pen-

dingin reaktor tidak lagi bertumpu pada pengendalian parameter kimia secara konvensional, tetapi mulai terintegrasi dengan sistem pemantauan digital, sensor pintar, analitik data besar, dan kecerdasan buatan. Amerika Serikat, misalnya, menunjukkan penekanan pada *hydrogen water chemistry*, injeksi zinc, pemantauan kimia daring, serta pengembangan model korosi lanjut untuk mendukung *predictive maintenance*. Jepang menonjol dalam pengembangan pemodelan kimia suhu tinggi, studi radiolisis air, serta teknologi pemantauan untuk lingkungan operasi ekstrem. Korea Selatan memperlihatkan arah penguatan kontrol kimia digital dan diagnostik real-time pada reaktor daya modern dan SMR. Sementara itu, Tiongkok menunjukkan kecenderungan integrasi yang lebih luas antara pemantauan berbasis AI, sensor optik, *big data analytics*, dan pengembangan material pelindung berbasis nanoteknologi untuk meningkatkan ketahanan korosi.

Pola komparatif tersebut menunjukkan bahwa pengelolaan kimia pendingin telah mengalami transformasi dari sistem yang semula bersifat reaktif dan berbasis inspeksi berkala menuju sistem yang lebih proaktif, adaptif, terdigitalisasi, dan terintegrasi. Dalam paradigma baru ini, kimia pendingin tidak lagi hanya berfungsi sebagai pendukung operasi harian reaktor, tetapi berkembang menjadi instrumen strategis untuk mendeteksi dini perubahan kondisi redoks, kecenderungan korosi, degradasi material, pembentukan produk aktivasi, serta potensi anomali operasi. Dengan demikian, kimia pendingin semakin menempati posisi penting dalam menjamin keselamatan, keandalan, keberlanjutan, dan efisiensi ekonomi PLTN masa depan.

Bagi Indonesia, pembacaan terhadap Tabel 2.1 memberikan pelajaran penting bahwa kesiapan menuju PLTN dan SMR tidak cukup hanya bertumpu pada pemilihan teknologi reaktor, tetapi

juga memerlukan kesiapan sistem pendukung keselamatan kimia yang modern. Tantangan utama terletak pada pembangunan infrastruktur digital, ketersediaan data historis yang tervalidasi, penguatan kapasitas sumber daya manusia, serta kemampuan mengintegrasikan sensor, basis data operasi, model prediktif, dan sistem pengambilan keputusan ke dalam kerangka regulasi keselamatan nasional. Interoperabilitas antarkomponen tersebut menjadi faktor kunci agar inovasi pengelolaan kimia pendingin dapat diterapkan secara andal, terukur, dan sesuai dengan kebutuhan pengembangan PLTN dan SMR di Indonesia.

Tabel 2.1 Strategi Pengelolaan Kimia Pendingin Reaktor oleh Negara-Negara Utama

Negara	Fokus Strategi	Teknologi Utama	Sumber
Amerika Serikat	PWR, BWR, SMR; pengendalian korosi dan paparan radiasi sekunder	Hydrogen water chemistry, injeksi zinc, online monitoring, AI predictive monitoring, corrosion modeling	Andresen et al. (2003); Lin (2000); IAEA (2020); Beznosov et al. (2022)
Jepang	ABWR, HTGR, reaktor cepat; radiolisis dan kimia suhu tinggi	Supercritical water chemistry, sensor robotik, diagnostik lingkungan ekstrem	Katsumura et al. (1998); Shoji (2010); IAEA (2020); Beznosov et al. (2022)

Negara	Fokus Strategi	Teknologi Utama	Sumber
Korea Selatan	APR1400 dan SMART SMR; kontrol kimia digital	Injeksi zinc/hidrogen, smart sensor network, real-time diagnostics, digital control	Park et al. (2022); Lee et al. (2021); IAEA (2020); Beznosov et al. (2022)
Tiongkok	Hualong One, HTR-PM; pemantauan kimia terintegrasi	CCMS, I&C digital, AI monitoring, big data analytics, sensor optik, nano-coating	Zhang et al. (2021); Park et al. (2022); Lee et al. (2021); IAEA (2020); Beznosov et al. (2022)

C. Arah dan Tantangan Pengembangan ke Depan Kimia Pendingin Reaktor

Evolusi pengelolaan kimia pendingin reaktor selama lebih dari setengah abad menunjukkan pergeseran mendasar dari kontrol kualitas air yang bersifat konvensional menuju sistem keselamatan berbasis data, kecerdasan buatan, dan analitik prediktif. Pada tahap awal, kimia pendingin terutama berfungsi untuk menjaga parameter dasar, seperti pH, konduktivitas, oksigen terlarut, serta kemurnian fluida pendingin agar tetap berada dalam batas operasi yang ditetapkan. Namun, memasuki era reaktor generasi lanjut, fungsi tersebut berkembang menjadi bagian strategis dalam menjamin keandalan jangka panjang, efisiensi operasi, perpanjangan umur reaktor, serta deteksi dini terhadap degradasi sistem (Beznosov et al., 2022; Yu et al., 2021).

Kompleksitas pengelolaan kimia pendingin semakin meningkat seiring berkembangnya berbagai tipe reaktor, seperti *Small Modular Reactor* (SMR), *High Temperature Gas-cooled Reactor* (HTGR), dan PLTN multi-loop. Setiap tipe reaktor memiliki karakteristik kimia, temperatur operasi, jenis fluida pendingin, kondisi radiokimia, serta tantangan material yang berbeda. Kondisi tersebut menuntut pendekatan pengelolaan kimia pendingin yang lebih adaptif, mampu merespons dinamika operasi secara cepat, dan dapat memberikan indikasi dini terhadap perubahan kondisi redoks, kecenderungan korosi, pembentukan produk aktivasi, serta potensi degradasi material (Zhang et al., 2021).

Perkembangan teknologi digital membuka peluang besar untuk menggeser sistem pengelolaan kimia pendingin dari pendekatan korektif menuju sistem prediktif berbasis data. Inovasi seperti *machine learning* (ML), *big data analytics*, sensor pintar, sistem pemantauan daring, dan *digital twin* memungkinkan pemantauan kondisi kimia secara *real-time*, pemodelan kondisi operasi, serta prediksi dini terhadap kecenderungan kerusakan material. Pendekatan ini mendukung strategi *predictive maintenance* dan dapat mengurangi ketergantungan pada inspeksi manual berkala, sepanjang didukung oleh kualitas data historis yang memadai, resolusi sensor yang baik, serta validasi model yang konsisten (Beznosov et al., 2022; IAEA, 2020).

Dengan perkembangan tersebut, kimia pendingin reaktor semakin menempati posisi sebagai salah satu pilar keselamatan, sejajar dengan sistem mekanik, termohidraulika, neutronik, dan proteksi radiasi. Pengelolaan kimia tidak lagi hanya berfungsi menjaga parameter operasi dalam batas tertentu, tetapi juga menjadi instrumen diagnostik untuk membaca kondisi kesehatan sistem reaktor secara dini, terukur, dan berkelanjutan. Dalam

paradigma ini, perubahan parameter kimia pendingin dapat berperan sebagai indikator awal bagi kecenderungan degradasi material, ketidakstabilan redoks, peningkatan produk korosi, maupun potensi anomali operasi.

Indonesia memiliki modal awal yang penting melalui pengalaman pengelolaan sistem pendingin pada reaktor riset seperti RSG-GAS, TRIGA, dan Kartini. Berbagai kajian, termasuk validasi nilai-G, eksperimen radiolisis suhu tinggi, surveilans korosi, serta pemetaan karakteristik kimia pendingin, telah memberikan fondasi ilmiah bagi pengembangan sistem keselamatan kimia reaktor nasional (Sunaryo et al., 2017). Namun, untuk menjawab tantangan PLTN dan SMR ke depan, pengalaman tersebut perlu ditransformasikan menjadi sistem yang lebih terintegrasi, terdigitalisasi, dan selaras dengan standar keselamatan internasional.

Arah pengembangan ke depan perlu mencakup beberapa agenda strategis. Pertama, pembangunan basis data nasional kimia pendingin dan degradasi material reaktor yang terstruktur, tervalidasi, dan dapat digunakan untuk pemodelan prediktif. Kedua, pengembangan sistem pemantauan daring berbasis sensor pintar untuk parameter kimia, radiokimia, dan korosi. Ketiga, pembangunan fasilitas uji skala laboratorium dan pilot untuk validasi aditif, material, sensor optik, serta model kinetika radiolisis. Keempat, integrasi AI, *machine learning*, dan *digital twin* ke dalam sistem pemantauan keselamatan reaktor. Kelima, penyusunan regulasi dan standar nasional yang adaptif terhadap perkembangan teknologi reaktor generasi lanjut.

Untuk memperjelas arah perubahan tersebut, Tabel 2.2 menyajikan inovasi pengelolaan kimia pendingin dalam teknologi reaktor nuklir, mulai dari tahap konvensional, terintegrasi, hingga prediktif.

Data pada Tabel 2.2 menunjukkan bahwa pengelolaan kimia pendingin berkembang dari sistem korektif berbasis inspeksi manual menuju sistem terintegrasi dengan pemantauan daring, hingga mencapai tahap prediktif yang didukung kecerdasan buatan dan analitik data besar. Pada tahap konvensional, pengelolaan kimia bersifat reaktif dan berfokus pada pengukuran parameter statis, seperti pH, konduktivitas, dan oksigen terlarut. Pada tahap terintegrasi, pemantauan daring dan kontrol kimia berbasis sensor digital mulai digunakan, termasuk injeksi aditif seperti hidrogen dan zinc untuk mengendalikan kondisi redoks dan menekan laju korosi. Pada tahap prediktif, AI, *machine learning*, *digital twin*, dan *big data analytics* digunakan untuk mendeteksi anomali, memprediksi degradasi material, serta mendukung optimasi pengambilan keputusan keselamatan secara *real-time*.

Salah satu teknologi kunci dalam tahap prediktif adalah *digital twin*, yaitu representasi digital dari sistem pendingin reaktor yang diperbarui secara kontinu berdasarkan data sensor. Teknologi ini memungkinkan simulasi kondisi operasi, evaluasi skenario gangguan, deteksi anomali, serta pengambilan keputusan berbasis model tanpa harus melakukan intervensi langsung terhadap sistem fisik (Tibaoui et al., 2019). Dengan pendekatan ini, sistem kimia pendingin tidak hanya dipantau, tetapi juga dimodelkan, dianalisis, dan diproyeksikan untuk mendukung keselamatan operasi secara lebih proaktif.

Tabel 2.2 Sistem Pengelolaan Kimia Pendingin dalam Teknologi Reaktor Nuklir

Sistem Penge-lolaan	Karak-teristik	Teknologi Pendukung	Arah Pengem-bangan	Sumber
Konven-sional	Korektif dan berbasis parameter dasar	Sampling manual, pH, konduk-tivitas, oksigen terlarut	Menjaga kualitas air, terbatas untuk deteksi real-time	IAEA TECDOC-1926; Beznosov et al. (2022)
Ter-integrasi	Online moni-toring dan kontrol responsif	Sensor digital, pemantauan daring, hydrogen/ zinc injection	Deteksi cepat, pengendalian korosi, keandalan operasi	IAEA TECDOC-1926; Zhang et al. (2021); Park et al. (2022)
Prediktif	Deteksi dini berbasis AI dan big data	Smart sensors, digital twin, ML analytics, real-time diagnostics	Predictive maintenance, deteksi anomali, prediksi degradasi material	Beznosov et al. (2022); IAEA TECDOC-1926; Zhang et al. (2021); Park et al. (2022)

Bagi Indonesia, perkembangan ini membuka peluang strategis untuk membangun sistem pengelolaan kimia pendingin berbasis teknologi cerdas. Penyusunan peta jalan nasional yang mengintegrasikan AI, *digital twin*, basis data kimia pendingin, dan sistem pemantauan *real-time* menjadi langkah penting

dalam mendukung kesiapan SMR dan PLTN. Peta jalan tersebut perlu melibatkan BRIN sebagai penyedia basis ilmiah dan teknologi, BAPETEN sebagai regulator keselamatan, perguruan tinggi sebagai pusat pengembangan sumber daya manusia, serta industri sebagai mitra dalam pengembangan sensor, material, sistem purifikasi, dan perangkat digital pendukung.

Inisiatif tersebut perlu didukung oleh regulasi yang progresif, penguatan kapasitas kelembagaan, pengembangan sumber daya manusia lintas disiplin, serta kolaborasi nasional dan internasional yang berkelanjutan. Dengan langkah tersebut, kimia pendingin reaktor tidak hanya berperan dalam mendukung operasi teknis, tetapi juga menjadi bagian dari strategi nasional dalam membangun sistem energi nuklir yang aman, andal, berkelanjutan, dan mendukung target *Net-Zero Emission* 2060.

Secara keseluruhan, arah pengembangan kimia pendingin reaktor menunjukkan bahwa masa depan teknologi nuklir tidak lagi hanya ditentukan oleh desain mekanik, neutronik, dan termohidraulika, tetapi juga oleh kemampuan memahami, memantau, dan memprediksi dinamika kimia sistem secara *real-time*. Dalam konteks ini, penguasaan kimia pendingin reaktor menjadi salah satu fondasi penting bagi kemandirian teknologi PLTN Indonesia.

III. ESENSI/SARI PATI KARYA ILMIAH

Esensi karya ilmiah dalam orasi ini adalah pengembangan ilmu kimia pendingin reaktor sebagai bagian integral dari keselamatan reaktor nuklir. Kimia pendingin tidak diposisikan semata sebagai sistem pendukung operasi, tetapi sebagai sistem dinamis yang menghubungkan proses radiolisis, interaksi kimia-material, degradasi struktur, kestabilan operasi, serta strategi keselamatan jangka panjang reaktor.

Kompetensi ilmiah tersebut dibangun melalui rangkaian penelitian, pengembangan, pengkajian, dan penerapan teknologi selama lebih dari tiga dekade. Penelitian ini mencakup aspek fundamental, eksperimental, simulatif, dan aplikatif dalam bidang radiolisis air, kinetika reaksi spesies kimia, korosi material, pengelolaan sistem pendingin, serta pengembangan pendekatan prediktif berbasis data. Dengan demikian, sari pati karya ilmiah ini terletak pada transformasi kimia pendingin reaktor dari pendekatan pengendalian kualitas air yang bersifat konvensional menuju kerangka keselamatan kimia reaktor yang prediktif, adaptif, dan terintegrasi.

A. Temuan Fundamental Radiolisis dan Kinetika Reaksi

Kontribusi fundamental pertama adalah pemahaman mekanistik mengenai radiolisis air dalam lingkungan radiasi neutron, sinar- γ , dan berkas elektron. Penelitian ini menjelaskan dinamika pembentukan spesies reaktif, seperti radikal hidroksil ($\bullet\text{OH}$), elektron terhidrasi (e^-_{aq}), radikal hidrogen ($\bullet\text{H}$), hidrogen peroksida (H_2O_2), dan gas hidrogen (H_2), yang berperan penting dalam menentukan kestabilan kimia pendingin reaktor.

Penelitian dilakukan melalui eksperimen *pulse radiolysis*, pengukuran kimia radiasi, serta simulasi kinetika reaksi pada berbagai kondisi suhu dan karakteristik *Linear energy transfer* (LET) (Sunaryo et al., 1994; Sunaryo et al., 1995a; Sunaryo et al., 1995b). Hasil penelitian menghasilkan data primer radiolisis air pada kondisi suhu tinggi dan medan radiasi yang relevan dengan operasi reaktor, termasuk nilai-G (*chemical yields*) dan konstanta kinetika reaksi spesies radiolisis.

Validasi dilakukan menggunakan pendekatan Monte Carlo untuk estimasi nilai-G dan pemodelan kinetika menggunakan perangkat lunak FACSIMILE hingga temperatur 300°C (Sunaryo & Domae, 2008). Kontribusi ini memperkuat pemahaman bahwa perubahan komposisi kimia pendingin akibat radiolisis bukan fenomena terpisah dari keselamatan reaktor, melainkan faktor yang secara langsung memengaruhi kondisi redoks, pembentukan oksidator, laju korosi, degradasi material, dan kestabilan operasi sistem pendingin.

Dengan temuan ini, radiolisis air tidak lagi hanya dipahami sebagai fenomena kimia radiasi, tetapi sebagai dasar ilmiah dalam membangun model prediktif kimia pendingin reaktor pada kondisi operasi nyata.

B. Kontribusi terhadap Pemahaman Korosi dan Penuaan Material Reaktor

Kontribusi ilmiah kedua adalah pengembangan pemahaman mengenai korosi dan penuaan material reaktor dalam sistem pendingin jangka panjang. Penelitian ini diarahkan pada evaluasi degradasi material struktural, termasuk paduan AlMg₂, AlMg₃, baja karbon, dan baja tahan karat dalam lingkungan pendingin reaktor.

Pendekatan penelitian dilakukan melalui perendaman jangka panjang pada sistem pendingin primer dan sekunder, karakterisasi permukaan material, analisis perubahan struktur mikro, serta evaluasi pengaruh kualitas kimia air terhadap mekanisme korosi merata, korosi celah, dan korosi galvanik. Rangkaian penelitian ini menghasilkan data primer jangka panjang mengenai perilaku degradasi material dalam lingkungan pendingin reaktor tropis, yang masih terbatas dalam literatur internasional (Sunaryo et al., 2021; Sunaryo et al., 2024).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengendalian parameter kimia pendingin secara tepat mampu memperlambat degradasi material, mempertahankan integritas struktur, dan mendukung strategi perpanjangan umur operasi reaktor. Dalam konteks RSG-GAS, data korosi dan pengelolaan kualitas air pendingin memberikan landasan empiris bagi penguatan program *aging management*, evaluasi integritas material, serta pengembangan pendekatan pemantauan berbasis kondisi operasi aktual (*condition-based integrity assessment*).

Dengan demikian, kontribusi pada bidang korosi dan penuaan material tidak hanya menghasilkan pemahaman ilmiah mengenai mekanisme degradasi, tetapi juga menyediakan basis data penting untuk pengelolaan keselamatan reaktor riset jangka panjang di Indonesia.

C. Pengembangan Kerangka Integratif Keselamatan Kimia Reaktor

Kebaruan utama dari rangkaian karya ilmiah ini adalah pengembangan Kerangka Integratif Keselamatan Kimia Reaktor, yaitu suatu pendekatan yang menghubungkan radiolisis, kinetika reaksi, interaksi kimia-material, degradasi material, validasi eksperimental, pemantauan daring, dan analitik prediktif dalam

satu sistem keselamatan yang utuh. Kerangka ini dibangun atas pemahaman bahwa kimia pendingin tidak hanya berfungsi untuk menjaga kualitas fluida pendingin, tetapi juga berperan dalam membaca kondisi kesehatan sistem reaktor melalui perubahan parameter kimia, radiokimia, dan korosi secara lebih dini dan terukur (IAEA, 2006; Lister & Uchida, 2015; IAEA, 2025).

Secara ilmiah, kerangka ini bertumpu pada keterkaitan antara radiolisis air, pembentukan spesies kimia reaktif, perubahan kondisi redoks, serta interaksi antara fluida pendingin dan material struktur. Dalam lingkungan radiasi, air pendingin mengalami radiolisis yang menghasilkan spesies primer seperti elektron terhidrasi, radikal hidrogen, radikal hidroksil, hidrogen molekuler, dan hidrogen peroksida. Spesies-spesies tersebut dapat memengaruhi kondisi oksidatif sistem, laju korosi, pembentukan produk korosi, serta integritas material dalam jangka panjang. Pemahaman terhadap mekanisme radiolisis pada temperatur tinggi menjadi dasar penting bagi pengembangan strategi pengendalian kimia pendingin reaktor, terutama pada sistem reaktor air ringan dan reaktor generasi lanjut (Sunaryo et al., 1995; Butarbutar et al., 2014; Sunaryo, 2017).

Kerangka ini dapat dipandang sebagai salah satu pengembangan awal di Indonesia yang mengintegrasikan data radiolisis suhu tinggi, basis data degradasi material jangka panjang, dan pendekatan keselamatan berbasis data ke dalam sistem pengelolaan kimia pendingin reaktor secara prediktif dan adaptif. Dengan pendekatan tersebut, pengelolaan kimia pendingin tidak lagi hanya dilakukan setelah terjadi penyimpangan parameter operasi, tetapi diarahkan untuk mendeteksi kecenderungan perubahan sistem sebelum berkembang menjadi degradasi yang lebih serius. Paradigma ini sejalan dengan perkembangan internasional yang mulai menggabungkan pemantauan daring,

diagnostik kimia air, pengendalian korosi, dan analitik data dalam pengelolaan keselamatan reaktor nuklir modern (IAEA, 2006; Lister & Uchida, 2015; IAEA, 2025).

Dalam kerangka ini, sistem pendingin dipandang sebagai bagian aktif dari strategi *defence-in-depth*. Perubahan pH, konduktivitas, oksigen terlarut, potensial redoks, konsentrasi produk korosi, aktivitas radionuklida, dan parameter kimia lainnya dapat menjadi indikator awal terhadap perubahan kondisi operasi, kecenderungan korosi, anomali sistem, maupun penurunan integritas material. Dengan demikian, kimia pendingin tidak hanya berperan sebagai sistem pengendalian kualitas air, tetapi juga sebagai instrumen diagnostik yang membantu memperkuat lapisan pencegahan dalam keselamatan reaktor. Pendekatan ini konsisten dengan prinsip keselamatan reaktor yang menekankan pentingnya pencegahan, deteksi dini, dan pengendalian kondisi abnormal melalui beberapa lapisan pertahanan yang saling melengkapi (IAEA, 2016; IAEA, 2006).

Kerangka integratif ini juga membuka arah pengembangan sistem pemantauan berbasis sensor digital, kecerdasan buatan, *machine learning*, *big data analytics*, dan *digital twin*. Melalui pendekatan tersebut, data kimia pendingin dapat diolah untuk mengidentifikasi pola perubahan sistem, mendeteksi anomali secara dini, memprediksi kecenderungan degradasi material, serta mendukung pengambilan keputusan operasi dan keselamatan secara lebih adaptif. Dalam konteks reaktor nuklir modern, pemanfaatan metode berbasis data dan *prognostics and health management* semakin relevan karena memungkinkan sistem keselamatan bergerak dari pendekatan korektif menuju pendekatan prediktif (Zhao et al., 2021; Huang et al., 2023). Sementara itu, konsep *digital twin* memberikan peluang untuk membangun representasi digital dari sistem pendingin reaktor

yang dapat diperbarui secara kontinu berdasarkan data sensor dan digunakan untuk simulasi, evaluasi skenario, serta dukungan keputusan berbasis model (Rasheed et al., 2020).

Dengan demikian, kimia pendingin reaktor dapat diposisikan sebagai sistem intelijen keselamatan yang mampu merefleksikan dinamika radiokimia, degradasi material, dan perubahan integritas sistem secara dini, terukur, dan berkelanjutan. Posisi ini menegaskan bahwa penguasaan kimia pendingin tidak hanya diperlukan untuk menjaga parameter operasi dalam batas yang diizinkan, tetapi juga untuk membangun sistem keselamatan reaktor yang adaptif, prediktif, dan selaras dengan arah perkembangan teknologi nuklir modern.

D. Relevansi terhadap Pengembangan PLTN dan SMR Indonesia

Dalam konteks pengembangan PLTN dan SMR di Indonesia, Kerangka Integratif Keselamatan Kimia Reaktor memberikan landasan ilmiah bagi pembangunan sistem keselamatan yang lebih adaptif, responsif, dan berorientasi jangka panjang. Kesiapan teknologi nuklir nasional tidak cukup hanya ditentukan oleh pemilihan desain reaktor, tetapi juga oleh kemampuan membangun sistem pendukung keselamatan yang mampu memantau, memahami, dan memprediksi dinamika kimia pendingin selama operasi. Oleh karena itu, pengalaman pengelolaan kimia pendingin pada reaktor riset nasional, khususnya dalam aspek radiolisis, korosi, pemantauan parameter kimia, dan degradasi material, menjadi modal penting untuk memperkuat kesiapan Indonesia menuju pemanfaatan PLTN dan SMR.

Kontribusi ilmiah dalam bidang kimia pendingin reaktor relevan dalam beberapa aspek strategis. Pertama, kerangka ini

menyediakan dasar ilmiah bagi penguatan regulasi keselamatan kimia reaktor, terutama dalam menetapkan parameter pengendalian kimia, persyaratan pemantauan, dan indikator degradasi sistem. Kedua, kerangka ini mendukung penyusunan standar pengelolaan kimia pendingin berbasis data operasi aktual, bukan hanya berdasarkan pendekatan generik. Ketiga, kerangka ini memperkuat pengembangan sumber daya manusia yang memahami keterkaitan antara radiolisis, korosi, radiokimia, degradasi material, pemantauan daring, dan keselamatan reaktor. Keempat, kerangka ini membuka peluang pengembangan sistem pemantauan berbasis teknologi digital untuk mendukung operasi reaktor generasi lanjut. Arah tersebut sejalan dengan perkembangan internasional yang menempatkan pemantauan kimia air, diagnostik korosi, dan pengolahan data sebagai bagian penting dalam peningkatan keselamatan dan keandalan reaktor nuklir (IAEA, 2006; Lister & Uchida, 2015; IAEA, 2025).

Bagi Indonesia, pengembangan PLTN dan SMR juga menuntut kesiapan basis data nasional mengenai kimia pendingin, radiolisis, korosi, serta degradasi material dalam kondisi operasi yang relevan. Basis data tersebut diperlukan untuk mendukung validasi model, pengembangan sistem prediktif, serta penyusunan standar keselamatan yang sesuai dengan karakteristik teknologi reaktor yang akan digunakan. Tanpa basis data yang kuat dan tervalidasi, penerapan sistem berbasis AI, *machine learning*, dan *digital twin* akan menghadapi keterbatasan, terutama dalam hal akurasi prediksi, keandalan model, dan penerimaan regulatori. Karena itu, pembangunan data historis yang terstruktur, pemantauan daring yang konsisten, serta validasi eksperimental perlu menjadi bagian dari peta jalan nasional pengembangan keselamatan kimia reaktor (Zhao et al., 2021; Huang et al., 2023; Rasheed et al., 2020).

Dalam perspektif kelembagaan, pengembangan kerangka ini perlu melibatkan BRIN sebagai penyedia basis ilmiah dan teknologi, BAPETEN sebagai regulator keselamatan, perguruan tinggi sebagai pusat pengembangan sumber daya manusia, serta industri sebagai mitra dalam pengembangan sensor, sistem purifikasi, material, instrumentasi, dan perangkat digital pendukung. Kolaborasi tersebut penting agar pengelolaan kimia pendingin tidak berkembang secara terpisah sebagai kegiatan laboratorium, tetapi menjadi bagian dari sistem keselamatan nasional yang terintegrasi dengan kebutuhan desain, operasi, pengawasan, dan perawatan reaktor.

Dengan demikian, karya ilmiah ini menegaskan bahwa kimia pendingin reaktor telah berkembang dari disiplin pendukung operasi menjadi fondasi strategis dalam pembangunan sistem keselamatan reaktor masa depan. Paradigma ini diharapkan tidak hanya memperkuat kesiapan Indonesia dalam pengembangan PLTN dan SMR, tetapi juga menjadi kontribusi ilmiah Indonesia dalam membangun keselamatan reaktor nuklir berbasis pendekatan prediktif di tingkat global. Dalam kerangka tersebut, penguasaan kimia pendingin reaktor menjadi bagian dari kemandirian teknologi nuklir nasional, karena keselamatan reaktor masa depan tidak hanya ditentukan oleh desain mekanik, neutronik, dan termohidraulika, tetapi juga oleh kemampuan memahami, memantau, dan memprediksi dinamika kimia sistem secara real-time.

IV. KONTRIBUSI ILMIAH

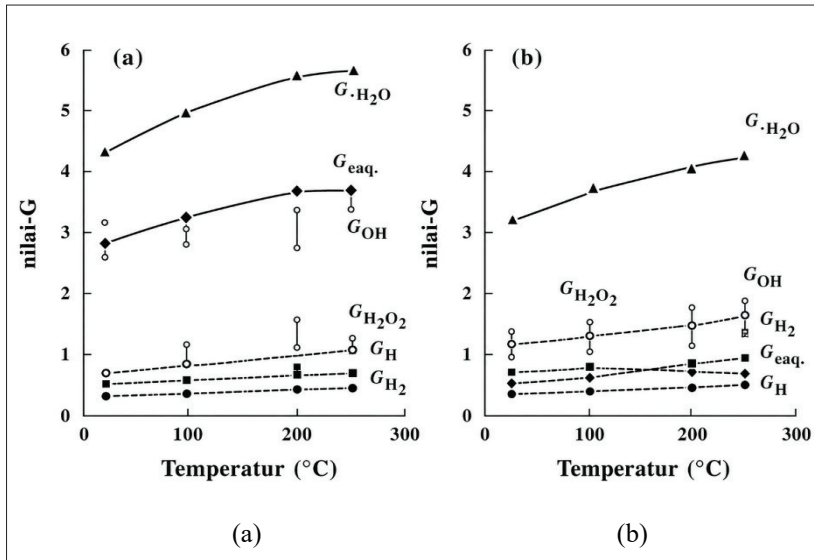
Kontribusi ilmiah utama dalam orasi ini adalah pengembangan Kerangka Integratif Keselamatan Kimia Reaktor berbasis data primer, validasi eksperimental, dan pemodelan prediktif. Kerangka ini menghubungkan radiolisis air, kinetika reaksi spesies kimia, degradasi material, pengendalian korosi, *aging management*, serta pengelolaan sistem pendingin reaktor secara adaptif dan berbasis data. Selama lebih dari tiga dekade, penelitian ini menggeser paradigma kimia pendingin dari pendekatan reaktif menuju sistem keselamatan kimia yang prediktif, terdigitalisasi, dan mendukung pengambilan keputusan keselamatan reaktor.

A. Data Radiolisis Air Pendingin Reaktor

Kontribusi awal penelitian ini berangkat dari radiolisis air sebagai proses utama yang menentukan perubahan kimia pendingin selama operasi reaktor. Interaksi radiasi dengan air menghasilkan spesies reaktif seperti $\bullet\text{OH}$, $\bullet\text{H}$, $\text{e}^{-\text{aq}}$, H_2 , H_2O_2 , dan O_2 , yang memengaruhi kondisi redoks, korosi, dan stabilitas material reaktor.

Melalui metode scavenger, iradiasi gamma dan neutron, serta pulse radiolysis berbasis LINAC, diperoleh data primer nilai-G radiolisis air pada berbagai temperatur dan medan radiasi (Gambar 4.1). Hasil eksperimen menunjukkan bahwa neutron cepat menghasilkan spesies molekuler seperti H_2 dan H_2O_2 lebih tinggi dibandingkan radiasi sinar- γ , sedangkan pada temperatur sekitar 250°C nilai-G H_2O_2 dan H_2 menurun sekitar 30–60% akibat meningkatnya mobilitas radikal dan rekombinasi primer

(Katsumura et al., 1994; Sunaryo et al., 1994; Sunaryo et al., 1995a; Sunaryo et al., 1995b; Katsumura et al., 1998; Sunaryo et al., 2011; Butarbutar et al., 2014; Butarbutar et al., 2018).



Keterangan: (a) sinar- γ ; (b) neutron

Sumber: Sunaryo et al. (1995)

Gambar 4.1 Pengaruh temperatur terhadap nilai-G spesies radiolisis hasil iradiasi

Kontribusi ilmiah dari tahap ini adalah tersedianya data primer radiolisis air suhu tinggi dan iradiasi neutron cepat yang relevan dengan kondisi operasi reaktor. Data ini memperkuat basis radiokimia reaktor dan menjadi dasar pengembangan model kinetika kimia pendingin.

B. Model Kinetika dan *Predictive Coolant Chemistry*

Berdasarkan data radiolisis, dikembangkan model kinetika reaksi spesies radikal utama, seperti $\bullet\text{OH}$, $\bullet\text{H}$, dan $e^{-\text{aq}}$, untuk menjelaskan hubungan antara radiolisis, perubahan redoks, stabilitas kimia pendingin, dan degradasi material (Shiraishi et al., 1994; Sunaryo et al., 1995b; Sunaryo & Domae, 2008).

Model tersebut menjadi dasar konsep *predictive coolant chemistry*, yaitu pendekatan pengelolaan kimia pendingin berbasis data kinetika, parameter kimia, sensor digital, pemantauan daring, kecerdasan buatan, dan digital twin. Dengan pendekatan ini, perubahan redoks, peningkatan oksidator, serta potensi degradasi material dapat dideteksi lebih dini sebelum berkembang menjadi risiko keselamatan (Sunaryo, 2000; Sunaryo & Domae, 2008; Bakhri et al., 2018; Hartini et al., 2022; Tibaoui et al., 2019; Zhang & Pei, 2022).

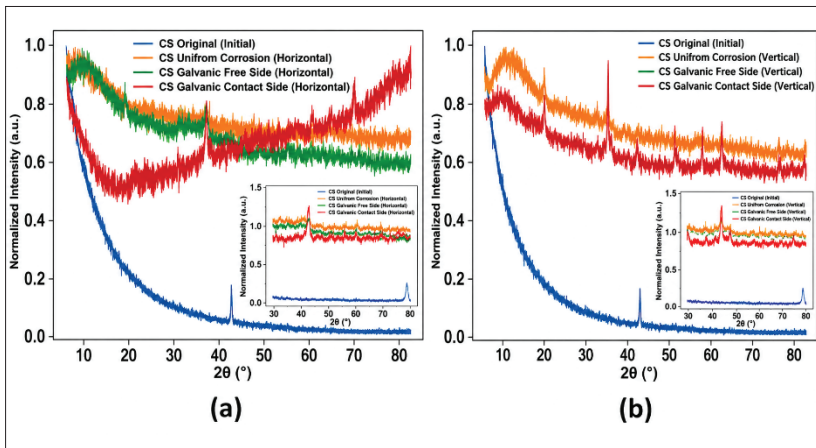
Kontribusi pada tahap ini adalah terbentuknya dasar ilmiah bagi sistem keselamatan kimia reaktor yang adaptif, prediktif, dan relevan bagi PLTN modern serta SMR.

C. Pengendalian Korosi dan Aging Management Material Reaktor

Kontribusi berikutnya adalah pembangunan basis data degradasi material jangka panjang pada sistem pendingin RSG-GAS. Selama durasi waktu hingga lebih dari 15 tahun, dilakukan pemantauan terhadap material penting, termasuk AlMg_2 sebagai material kelongsong bahan bakar, AlMg_3 sebagai material struktur kolam, baja karbon sebagai material pipa pendingin sekunder, serta SS-304 sebagai material pembanding dan pasangan galvanik.

Kajian empat tahun pada baja karbon dalam air PUSPIPTK menunjukkan bahwa kualitas air berpengaruh langsung terhadap degradasi material. Klorida dan kesadahan yang melampaui ambang menjadi pemicu korosi lokal, terutama pada celah dan pasangan galvanik. Laju korosi baja karbon terukur sebesar $1,19 \times 10^{-4}$ m/tahun, dan hasil XRD menunjukkan bahwa inhibitor menekan korosi umum tetapi tidak sepenuhnya menghentikan oksidasi pada area yang dipengaruhi kontak galvanik (Gambar 4.2).

Kajian paling panjang dilakukan terhadap paduan AlMg₂ yang direndam selama 15 tahun dalam *interim spent fuel pool* RSG-GAS yang terhubung dengan sistem pendingin primer.



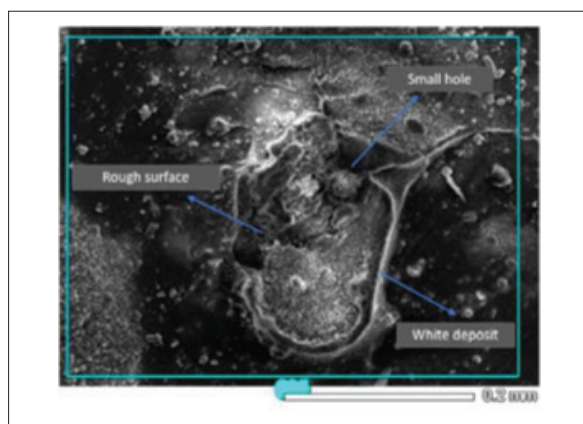
Keterangan: (a) Posisi horizontal; (b) Posisi vertikal

Sumber: Sunaryo et al (2024)

Gambar 4.2 Pola XRD baja karbon setelah perendaman selama empat tahun dalam air pendingin yang mengandung inhibitor. Perbandingan tersebut menunjukkan pengaruh orientasi kupon dan konfigurasi galvanik terhadap pembentukan produk korosi.

Hasil pengamatan mikroskopik SEM menunjukkan ketahanan korosi sangat baik, dengan area terdampak sekitar 0,01% dan kedalaman sumuran di bawah 5 μm (Gambar 4.3). Temuan ini menunjukkan bahwa pengendalian kimia air primer yang stabil mampu mempertahankan lapisan oksida pasif dan menjaga integritas material dalam jangka panjang.

Dengan demikian, data paparan aktual empat hingga lima belas tahun memberikan dasar ilmiah bagi aging management material reaktor riset di Indonesia, termasuk evaluasi ketahanan material, model degradasi, estimasi *remaining useful life*, strategi inspeksi, dan surveilans material.



Sumber: Sunaryo et.al. (2025)

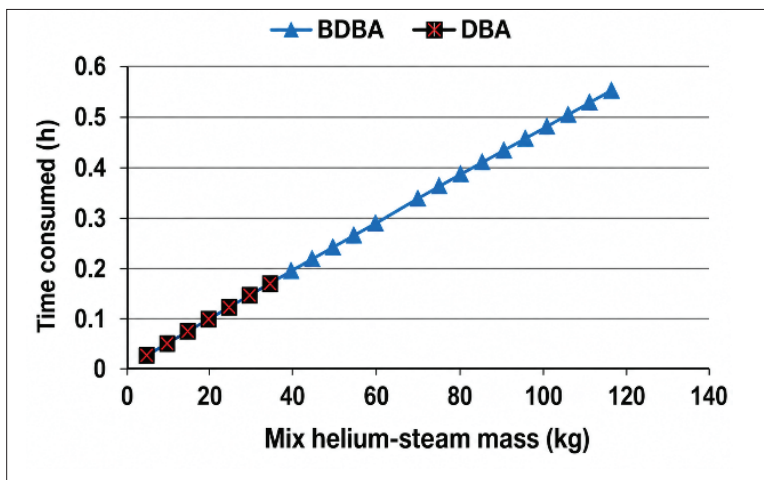
Gambar 4.3 Lokasi fokus pengamatan mikroskopik/SEM pada permukaan paduan AlMg₂ setelah 15 tahun perendaman dalam air pendingin primer RSG-GAS. Area pengamatan menunjukkan fitur lokal berupa permukaan kasar (*rough surface*), lubang kecil atau sumuran dangkal (*small hole*), dan endapan putih (*white deposit*).

D. Sistem Pendingin Reaktor Generasi Lanjut dan Aplikasinya

Kontribusi kimia pendingin reaktor juga berkembang menuju reaktor generasi lanjut dan aplikasi non-listrik. Pada *High Temperature Gas-cooled Reactor* (HTGR), termasuk Reaktor Daya Eksperimental (RDE), penguasaan kimia pendingin diperlukan untuk menjaga kemurnian helium, mengendalikan pengotor, mempertahankan stabilitas grafit, dan mencegah degradasi material pada temperatur tinggi.

Salah satu skenario penting adalah water ingress accident, yaitu masuknya air atau uap air ke sistem primer akibat *Steam Generator Tube Rupture* (SGTR). Simulasi ChemCAD menunjukkan bahwa pada skenario *Design Basis Accident* (DBA) dengan air sekitar 35 kg dan *Beyond Design Basis Accident* (BDBA) sekitar 110 kg, Helium Purification System (HPS) mampu membersihkan uap air dalam waktu maksimum sekitar 0,5 jam pada skenario berat. Temuan ini menegaskan peran HPS sebagai mekanisme mitigasi keselamatan kimia HTGR (Gambar 4.4, Sriyono et al., 2018).

Selain itu, kajian kopling PeLUIT-40 dengan *Solid Oxide Electrolysis Cell* (SOEC) menunjukkan bahwa panas nuklir temperatur tinggi dapat dimanfaatkan untuk menyediakan uap proses bagi produksi hidrogen. Dalam konteks ini, kimia pendingin dan pengendalian fluida kerja menjadi penting untuk menjaga kualitas uap, stabilitas perpindahan panas, efisiensi elektrolisis, serta integritas material pada temperatur tinggi (Sriyono et al., 2025).



Sumber: Sriyono et al (2018)

Gambar 4.4 Hasil simulasi kemampuan *Helium Purification System* (HPS) dalam memurnikan campuran helium-uap air pada skenario *Design Basis Accident* (DBA) dan *Beyond Design Basis Accident* (BDDBA).

E. Sintesis Kontribusi Ilmiah

Secara keseluruhan, kontribusi ilmiah ini membentuk kerangka integratif keselamatan kimia reaktor yang menghubungkan radiolisis, kinetika reaksi, korosi, degradasi material, sistem pendingin generasi lanjut, serta *predictive coolant chemistry* berbasis kecerdasan buatan dan digital twin.

Melalui kerangka ini, kimia pendingin diposisikan sebagai bagian integral dari sistem keselamatan reaktor yang mampu memberikan indikasi dini terhadap perubahan kondisi kimia, kecenderungan degradasi material, dan potensi penurunan integritas sistem. Dalam konteks PLTN dan SMR Indonesia,

kontribusi ini memperkuat kesiapan teknologi nasional, regulasi keselamatan, pengembangan sumber daya manusia, serta kemandirian energi nuklir yang aman, andal, dan berkelanjutan.

Tabel 4.1 Ringkasan Kontribusi Individual dalam Pengembangan Kimia Pendingin Reaktor.

Bidang Penelitian	Kontribusi Individual	Dampak Ilmiah
Radiolisis air suhu tinggi	Validasi nilai-G dan kinetika reaksi	Basis model radiokimia
Korosi material RSG-GAS	Database degradasi jangka panjang	Aging management
Sistem pendingin RDE	Adaptasi sistem pemurnian helium	Kesiapan HTGR
Kimia pendingin digital	Konsep <i>predictive coolant chemistry</i>	<i>AI-based reactor safety</i>

V. KONTRIBUSI UMUM

Kontribusi umum dalam bab ini merupakan perluasan dari kontribusi ilmiah pada Bab IV, khususnya pengembangan Kerangka Integratif Keselamatan Kimia Reaktor berbasis data primer, validasi eksperimental, dan pemodelan prediktif. Kerangka ini tidak hanya memiliki nilai akademik, tetapi juga berimplikasi strategis bagi kesiapan teknologi, regulasi, industri, sumber daya manusia, dan kepercayaan publik terhadap pemanfaatan energi nuklir di Indonesia.

Dalam konteks rencana pembangunan PLTN skala kecil di Sumatra dan Kalimantan, keberhasilan implementasi PLTN tidak hanya ditentukan oleh desain reaktor, tetapi juga oleh kesiapan sistem keselamatan, kelembagaan, rantai pasok, sumber daya manusia, dan penerimaan masyarakat. Pengelolaan kimia pendingin reaktor menjadi salah satu fondasi penting karena berkaitan langsung dengan integritas material, pengendalian korosi, stabilitas operasi, dan keandalan jangka panjang sistem reaktor.

Pengalaman Indonesia selama lebih dari tiga dekade dalam pengelolaan kimia pendingin reaktor telah menghasilkan data primer radiolisis, surveilans korosi, evaluasi degradasi material, dan model prediktif. Data tersebut memberikan dasar teknis bagi penyusunan standar operasi, penguatan sistem keselamatan, pemantauan berbasis kondisi aktual, serta dukungan bagi reaktor daya dan SMR.

Data surveilans korosi dan evaluasi degradasi material dari sistem pendingin RSG-GAS 30MW juga relevan bagi perpanjangan izin operasi reaktor, khususnya dalam evaluasi integritas struktur, pengelolaan penuaan reaktor, dan justifikasi

keselamatan operasi jangka panjang. Selain itu, pengalaman RSG-GAS 30MW, RDE, dan pengembangan sistem helium untuk HTGR menunjukkan bahwa Indonesia memiliki kapasitas membangun sistem pendukung keselamatan reaktor secara mandiri.

Dalam konteks kebijakan, kontribusi ini menegaskan perlunya penguatan peran Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) sebagai *Technical Support Organization* (TSO), pengembangan regulasi keselamatan kimia oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN), penyusunan Standar Nasional Indonesia (SNI) terkait kimia pendingin reaktor, serta integrasi kecerdasan buatan dan *digital twin* dalam sistem pemantauan keselamatan reaktor nasional.

Untuk memperjelas hubungan antara ilmu dasar, teknologi, dan kebijakan, Gambar 5.1 menyajikan Kerangka Diagram Integratif Keselamatan Kimia Reaktor sebagai fondasi strategis pengembangan reaktor daya dan SMR. Diagram tersebut menggambarkan alur dari riset fundamental radiolisis dan degradasi material, transformasi menuju sistem prediktif berbasis sensor pintar, digital twin, dan kecerdasan buatan, hingga translasi ke dalam kebijakan, standar operasi, pengembangan sumber daya manusia, kesiapan industri, dan komunikasi publik berbasis sains.

Pada sektor industri, kontribusi ini membuka peluang pengembangan material tahan korosi, sistem pemurnian inovatif, sensor real-time, dan perangkat pemantauan digital untuk memperkuat rantai pasok nasional. Dalam aspek sumber daya manusia, hasil penelitian perlu diintegrasikan ke dalam pendidikan tinggi, pelatihan teknis, dan program pendidikan dan pelatihan PLTN agar terbentuk kompetensi lintas disiplin dalam radiolisis, korosi, kimia pendingin, pemantauan daring, kecerdasan buatan, dan keselamatan reaktor generasi lanjut.



Gambar 5.1 Kerangka Diagram Integratif Keselamatan Kimia Reaktor sebagai Fondasi Strategis Pengembangan Reaktor Daya dan SMR.

Kontribusi ini juga memiliki implikasi sosial melalui penguatan komunikasi risiko berbasis sains. Penerimaan publik terhadap teknologi nuklir memerlukan informasi yang transparan, konsisten, mudah dipahami, dan berbasis bukti ilmiah. Data keselamatan dari riset kimia pendingin dapat menjadi instrumen penting untuk membangun kepercayaan masyarakat terhadap teknologi nuklir secara berkelanjutan.

Dengan demikian, kontribusi ilmiah dalam kimia pendingin reaktor memberikan dasar konkret bagi kesiapan implementasi PLTN di Indonesia. Kontribusi ini memperkuat hubungan antara sains, teknologi, kebijakan, industri, sumber daya manusia, dan komunikasi publik dalam membangun sistem energi nuklir yang aman, andal, berkelanjutan, dan berdaulat.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

VI. KESIMPULAN

Orasi ini menegaskan bahwa penguasaan kimia sistem pendingin reaktor merupakan landasan strategis dalam membangun keselamatan reaktor nuklir dan memperkuat kedaulatan energi nasional. Kimia pendingin tidak lagi dapat dipandang semata sebagai aspek pendukung operasi, tetapi telah berkembang menjadi bagian integral dari sistem keselamatan reaktor yang menentukan kestabilan kimia, integritas material, keandalan operasi, serta umur panjang sistem nuklir.

Kontribusi ilmiah utama yang dihasilkan dalam orasi ini adalah pengembangan Kerangka Integratif Keselamatan Kimia Reaktor berbasis data primer, validasi eksperimental, dan pemodelan prediktif. Kerangka ini menghubungkan pemahaman fundamental radiolisis air, kinetika reaksi spesies kimia, pengendalian korosi, degradasi material, pemantauan daring, serta pendekatan berbasis kecerdasan buatan dan *digital twin* dalam satu sistem keselamatan yang utuh. Dengan pendekatan tersebut, pengelolaan kimia pendingin bergeser dari sistem yang bersifat reaktif menuju sistem yang prediktif, adaptif, dan berbasis data.

Secara ilmiah, kontribusi tersebut diwujudkan melalui diperolehnya data nilai-G spesies radiolisis pada kondisi iradiasi neutron cepat dan temperatur tinggi hingga 250°C, yang menjadi salah satu data eksperimental penting untuk merepresentasikan kondisi operasi reaktor nyata. Selain itu, studi korosi jangka panjang selama lebih dari 15 tahun pada sistem pendingin RSG-GAS telah menghasilkan basis data primer mengenai degradasi material reaktor dalam kondisi operasi aktual. Data

tersebut berpotensi menjadi rujukan nasional dalam pengelolaan kimia pendingin, evaluasi integritas struktur, dan strategi *aging management* reaktor riset.

Melalui pengendalian kimia pendingin yang terintegrasi, parameter operasi seperti pH, konduktivitas, dan oksigen terlarut dapat dipertahankan pada kondisi optimum, sehingga laju korosi material struktural RSG-GAS dapat ditekan jauh di bawah batas desain yang diizinkan. Hasil ini menunjukkan bahwa pengelolaan kimia pendingin yang tepat tidak hanya menjaga kualitas air, tetapi juga berperan langsung dalam mempertahankan integritas material, memperpanjang umur operasi komponen, dan meningkatkan keandalan keselamatan reaktor.

Dalam konteks nasional, pengembangan PLTN di Indonesia menghadapi tantangan yang tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga mencakup kesiapan kelembagaan, sumber daya manusia, regulasi, industri pendukung, serta kepercayaan publik. Hasil penelitian dalam bidang kimia pendingin reaktor memberikan dasar ilmiah yang kuat untuk menjawab tantangan tersebut, khususnya dalam membangun sistem keselamatan berbasis sains, data, dan transparansi. Oleh karena itu, penguatan regulasi keselamatan kimia, peran lembaga riset sebagai *Technical Support Organization* (TSO), serta integrasi sistem pemantauan berbasis kecerdasan buatan dan *digital twin* menjadi langkah penting dalam mendukung kesiapan PLTN dan SMR di Indonesia.

Dari perspektif pengembangan kapasitas nasional, kontribusi ini mendorong perlunya integrasi hasil penelitian ke dalam pendidikan tinggi, pelatihan teknis, dan program Diklat PLTN. Penguatan kompetensi sumber daya manusia perlu diarahkan pada pemahaman lintas disiplin, yang mencakup radiolisis, korosi material, pengendalian kimia pendingin, pemantauan

daring, analitik data, dan keselamatan reaktor generasi lanjut. Di sisi lain, kontribusi ini juga membuka peluang penguatan industri nasional dalam pengembangan material tahan korosi, sistem pemurnian, sensor pintar, dan perangkat pemantauan berbasis data *real-time*.

Secara sosial, kontribusi ini menegaskan pentingnya komunikasi risiko berbasis sains dalam membangun penerimaan publik terhadap teknologi nuklir. Kepercayaan masyarakat tidak dapat dibangun hanya melalui pernyataan bahwa teknologi nuklir aman, tetapi harus ditopang oleh data keselamatan, bukti ilmiah, keterbukaan informasi, dan tata kelola yang kredibel. Dalam hal ini, hasil riset kimia pendingin reaktor dapat menjadi bagian penting dalam membangun narasi keselamatan nuklir yang transparan dan dapat dipertanggungjawabkan.

Dengan demikian, kontribusi ilmiah dalam bidang kimia pendingin reaktor tidak hanya menghasilkan temuan baru dan perbaikan metodologis, tetapi juga membentuk arah kebijakan, penguatan kapasitas, dan ekosistem pengembangan teknologi nuklir nasional. Dalam jangka panjang, penguasaan kimia pendingin reaktor menjadi salah satu fondasi penting dalam mewujudkan sistem energi nuklir yang aman, andal, berkelanjutan, dan berdaulat.

Tanpa penguasaan aspek kimia pendingin dan keselamatan sistem secara menyeluruh, pembangunan PLTN yang aman, andal, dan berkelanjutan tidak akan dapat dicapai secara optimal. Sebaliknya, dengan fondasi ilmiah yang kuat, pengalaman operasi yang panjang, serta sistem keselamatan berbasis data dan prediksi, Indonesia memiliki peluang untuk memasuki era PLTN dengan lebih percaya diri, mandiri, dan bertanggung jawab.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

VII. PENUTUP

Setelah lebih dari tiga dekade, penelitian dalam bidang kimia pendingin reaktor di Indonesia telah menghasilkan data primer radiolisis suhu tinggi pada kondisi iradiasi neutron cepat, pengembangan model kinetika reaksi berbasis pendekatan prediktif, serta bukti lapangan pengelolaan korosi material selama lebih dari 15 tahun pada sistem pendingin RSG-GAS. Capaian tersebut menjadi fondasi penting dalam memperkuat keselamatan reaktor, pengelolaan penuaan sistem (*aging management*), dan pengembangan pendekatan keselamatan berbasis data untuk mendukung kesiapan teknologi PLTN nasional.

Menatap masa depan energi Indonesia, transisi menuju sumber energi rendah karbon merupakan keniscayaan. Dalam konteks tersebut, penguasaan kimia pendingin reaktor menjadi semakin strategis, tidak hanya sebagai aspek teknis operasi, tetapi juga sebagai bagian integral dari keselamatan nasional, keandalan sistem energi, dan kedaulatan teknologi bangsa. Kimia pendingin reaktor menempati posisi penting karena berkaitan langsung dengan kestabilan operasi, integritas material, pengendalian radiokimia, mitigasi korosi, serta keselamatan jangka panjang sistem reaktor.

Pengembangan PLTN dan SMR di Indonesia menuntut kesiapan teknologi yang tidak hanya bertumpu pada desain inti reaktor, sistem neutronik, dan termohidraulika, tetapi juga pada kemampuan mengelola sistem pendukung yang menentukan keandalan operasi. Dalam hal ini, sistem pendingin reaktor merupakan bagian vital dari arsitektur keselamatan karena berfungsi menjaga kestabilan termal, mengendalikan proses

kimia, membatasi degradasi material, serta mengurangi potensi pembentukan dan transport produk aktivasi.

Ke depan, tantangan yang dihadapi akan semakin kompleks. Reaktor generasi lanjut dan SMR menuntut kemampuan pengendalian kimia pendingin pada kondisi operasi ekstrem, temperatur tinggi, medan radiasi tinggi, serta sistem operasi yang semakin terdigitalisasi. Stabilitas kimia pendingin tidak lagi cukup dikendalikan melalui pendekatan konvensional yang bersifat reaktif, tetapi harus berkembang menuju sistem yang prediktif, adaptif, cerdas, dan terintegrasi berbasis data *real-time*.

Untuk menjawab tantangan tersebut, pengembangan disiplin ilmu kimia pendingin reaktor perlu diarahkan pada penguatan teknik analitik mutakhir, pemodelan kinetika berbasis data besar, integrasi kecerdasan buatan, analitik pembelajaran mesin, dan *digital twin* dalam sistem pemantauan serta pengendalian reaktor. Pada saat yang sama, penelitian fundamental mengenai interaksi radiolisis dengan material struktural pada kondisi operasi nyata perlu terus diperkuat untuk memastikan keandalan dan keselamatan sistem secara berkelanjutan.

Keberhasilan pengembangan bidang ini tidak dapat dicapai secara parsial, melainkan memerlukan penguatan ekosistem nasional secara menyeluruh. BRIN perlu memperkuat perannya sebagai *Technical Support Organization* (TSO) yang menyediakan basis ilmiah independen bagi pengambilan keputusan strategis nasional. BAPETEN memiliki peran penting dalam membangun kerangka regulasi keselamatan kimia yang lebih adaptif terhadap perkembangan reaktor generasi lanjut dan sistem digital berbasis kecerdasan buatan. Perguruan tinggi perlu memperkuat kurikulum, laboratorium, dan program riset multidisiplin yang selaras dengan kebutuhan teknologi PLTN masa depan.

Di sisi industri, penguatan kapasitas nasional menjadi sangat krusial, terutama dalam pengembangan material tahan korosi, sistem pemurnian kimia, sensor berbasis kecerdasan buatan, serta perangkat pemantauan digital *real-time*. Penguasaan teknologi pendukung tersebut akan menentukan tingkat kemandirian nasional dalam pembangunan dan pengoperasian PLTN. Oleh karena itu, pengembangan rantai pasok nasional dan industri teknologi dalam negeri perlu dipersiapkan sejak tahap awal pembangunan ekosistem nuklir nasional.

Selain penguatan nasional, perluasan jejaring regional dan internasional juga menjadi perhatian strategis. Kerja sama dengan *International Atomic Energy Agency* (IAEA), organisasi keselamatan nuklir regional, universitas, pusat riset, dan industri teknologi global perlu terus diperkuat, khususnya dalam bidang radiolisis suhu tinggi, degradasi material, pemantauan reaktor digital, keselamatan reaktor berbasis kecerdasan buatan, serta pengembangan standar keselamatan reaktor generasi lanjut.

Dalam konteks Asia dan *Global South*, Indonesia tidak seharusnya hanya menjadi pengguna teknologi, tetapi perlu berkembang sebagai pusat kontribusi ilmiah berbasis pengalaman operasi reaktor tropis, pengelolaan penuaan reaktor, dan pengembangan pendekatan keselamatan kimia reaktor berbasis data. Penguatan jejaring internasional juga penting untuk mengantisipasi dinamika geopolitik teknologi nuklir dunia, perubahan standar keselamatan global, serta kompetisi penguasaan teknologi energi bersih di masa depan.

Pada saat yang sama, penguatan komunikasi risiko berbasis sains kepada masyarakat menjadi faktor yang tidak dapat diabaikan. Penerimaan publik terhadap teknologi nuklir memerlukan pendekatan yang transparan, konsisten, berbasis bukti ilmiah, dan partisipatif. Keselamatan teknologi nuklir pada

akhirnya tidak hanya dibangun melalui desain teknis, tetapi juga melalui kepercayaan publik yang tumbuh dari komunikasi ilmiah yang kredibel dan berkelanjutan.

Dengan bekal keilmuan, pengalaman operasi, dan kapasitas riset yang telah dibangun selama lebih dari tiga dekade, Indonesia memiliki modal penting untuk menjawab tantangan pengembangan PLTN secara sistematis dan berkelanjutan. Keselamatan reaktor yang ditopang oleh penguasaan kimia sistem pendingin tidak lagi hanya dipandang sebagai persyaratan teknis, tetapi sebagai simbol kemandirian, keunggulan teknologi, dan kesiapan bangsa dalam memasuki era energi bersih berbasis ilmu pengetahuan dan inovasi.

Ke depan, pengembangan kimia pendingin reaktor tidak hanya akan menentukan keandalan sistem nuklir nasional, tetapi juga menjadi salah satu pilar penting dalam memperkuat posisi Indonesia sebagai negara yang mampu membangun teknologi nuklir secara aman, bertanggung jawab, dan mandiri. Dengan demikian, tata kelola kimia pendingin reaktor nuklir merupakan bagian penting dari perjalanan Indonesia menuju era PLTN untuk kemandirian energi nasional.

**"Keselamatan adalah fondasi,
sains adalah kekuatan, dan
kemandirian adalah tujuan"**

UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji dan syukur saya panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas rahmat dan karunia-Nya sehingga orasi ilmiah ini dapat saya sampaikan pada prosesi Pengukuhan Profesor Riset Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Momentum ini merupakan bentuk tanggung jawab ilmiah sekaligus komitmen untuk terus berkontribusi bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi nasional.

Ucapan hormat dan penghargaan saya sampaikan kepada Presiden Republik Indonesia ke-7, Ir. Joko Widodo, serta Presiden Republik Indonesia ke-8, Bapak Prabowo Subianto Djojohadikusumo, atas arah kebijakan strategis yang menempatkan riset dan inovasi sebagai fondasi pembangunan bangsa. Ucapan terima kasih saya sampaikan kepada Kepala BRIN, Prof. Dr. Arif Satria, S.P., M.Si., serta kepada Kepala BRIN periode sebelumnya, Dr. Laksana Tri Handoko, M.Sc., atas kepemimpinan yang telah memperkuat ekosistem riset yang kolaboratif, *modern*, dan berorientasi solusi. Penghargaan juga kepada Wakil Kepala BRIN, Prof. Dr. Ir. Amarulla Octavian, S.T., M.Sc., DESO., ASEAN Eng., atas arahannya dalam memperkuat peran iptek dalam ketahanan nasional dan kemaritiman.

Terima kasih kepada Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Prof. Ir. Wimpie Agoeng Noegroho Aspar, MSCE., Ph.D., Sekretaris Majelis, Prof. Dr. Ir. Zainal Arifin, M.Sc., dan seluruh anggota Majelis atas ketelitian dan bimbingannya. Ucapan terima kasih juga kepada Tim Penelaah Naskah Orasi Ilmiah: Prof. Muhayatun Santoso, Prof. Ferhat Aziz dan Prof. Abdul Waris, atas masukan berharga yang memperkaya substansi naskah ini.

Penghargaan saya sampaikan kepada Sekretaris Utama BRIN, Ibu Nur Tri Aries Suestiningtyas, M.A., atas dukungan administratif, serta kepada Kepala Organisasi Riset Tenaga Nuklir, Dr. Syaiful Bakhri, atas arah strategis penguatan riset di bidang ketenaganukliran. Terima kasih pula kepada Kepala Biro Organisasi dan SDM, Ibu Ratih Retno Wulandari, S.Sos., M.Si., serta Kepala Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir (PRTRN), Dr. Topan Setiadipura, atas dukungan dan kolaborasi riset yang produktif.

Rasa hormat saya persembahkan kepada para guru dan pembimbing, antara lain Almarhum Drs. Sutjipto Sudiro dan Almarhum Drs. Made Sumatra, atas bimbingan dan keteladanan ilmiah semasa saya memulai meniti karir sebagai peneliti di Badan Tenaga Nuklir Nasional. Juga, seluruh rekan eks Pusat Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir - Badan Tenaga Nuklir Nasional, dan PRTRN-ORTN, BRIN atas nuansa kerja kondusif yang tercipta.

Selain itu, hormat saya yang sangat tinggi kepada Prof. Dr. Kenkichi Ishigure, Prof. Dr. Yosuke Katsumura dan Dr. Hirosugu Shiraishi, atas bimbingan budaya ilmiah yang diajarkannya selama saya menempuh program Master dan Doktor di Tokyo University Japan.

Ucapan terima kasih yang dalam saya tujukan kepada orang tua kandung, almarhum Bapak Srinindyat Soenarjo dan ibunda tercinta Ibu Soeswarinah, serta orang tua mertua, almarhum Bapak Sunaryo Dargowiryono dan almarhumah Ibu Siti Sumijati, atas yang tak lelah memberikan semangat, doa dan nilai-nilai kehidupan yang menjadi pedoman saya.

Ucapan terimakasih yang paling dalam saya sampaikan kepada suami tercinta selamanya, Prof. Dr. Djarot Sulistio Wisnubroto, serta putra kami tersayang, Pandu Wisesa Wisnubroto S.H., atas

cinta kasih, kesabaran, doa dan penyemangatnya yang luar biasa serta tak henti yang menjadi sumber kekuatan dalam perjalanan hidup saya. Juga, terima kasih kepada adik-adik kandung saya, almarhum Gunung Bara, Banyu Dwinti, Bayu Galih dan Getih Indera, juga kakak serta adik ipar saya, mas Gatot Dewabroto, Tuti, Bayu dan Ari, atas dukungan semangat yang tidak pernah putus.

Terima kasih kepada Mbak Nur Febriani Lucky, Sekretaris Kepala Pusat Riset Tenaga Reaktor Nuklir-BRIN, atas kesabaran, dedikasi dan ketelitiannya dalam mendukung urusan administrasi dan koordinasi pengukuhan ini. Juga, terimakasih kepada sekretariat Majelis Profesor Riset, mbak Putri Heriyani dan mbak Yani Atyan Tyana, serta apresiasi yang tinggi kepada Panitia Pelaksana Pengukuhan atas penyelenggaraan acara yang khidmat dan profesional.

Akhimya, saya menyampaikan terima kasih kepada rekan dan sahabat alumni SD Yayasan Perguruan Cikini Jakarta angkatan 1969–1974, SMP Yayasan Perguruan Cikini Jakarta Angkatan 1975–1977, serta SMA Negeri IV Jakarta angkatan 1978–1981, alumni Akademi Kimia Analisis Bogor angkatan 1981–1984, rekan satu Lab. Aplikasi Kimia Radiasi, fakultas *Quantum Engineering and Systems Science*-Tokyo University Japan angkatan 1988–1994, atas semangat, kebersamaan, dan inspirasi budaya ilmiah yang mengiringi perjalanan hidup ini.

Semoga semua doa, dukungan, dan kebaikan yang telah diberikan menjadi amal jariyah dan semangat untuk terus berkarya bagi kemajuan riset, inovasi, dan kemandirian energi berkelanjutan Indonesia.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Andresen, P. L., and Morra, M. M. (2003). Review of water chemistry effects on corrosion and stress corrosion cracking in operating reactors. *Corrosion*, 59(10), 895–912. <https://doi.org/10.5006/1.3277593>
- Andresen, P. L., Angeliu, T. M., and Gorman, J. (2019). Effects of hydrogen water chemistry and zinc injection on corrosion fatigue of reactor materials. *Corrosion Science*, 148, 144–154. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.03.008>
- Ardebili, A. A., Zappatore, M., Ramadan, A. I. H., and Longo, A. (2024). *Digital twins* of smart energy systems: enablers, design, and computational challenges. *Energy Informatics*, 7, 94.
- Balakrishnan, R., Anantharaman, K., and Raju, M. (2021). Advances in nuclear reactor safety systems and instrumentation. *Progress in Nuclear Energy*, 138, 103840. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2021.103840>
- Beznosov, A. V., Kim, S., and Park, H. (2022). Digitalization and AI in water chemistry management of nuclear power plants: A roadmap to predictive maintenance. *Nuclear Engineering and Design*, 392, 111790. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111790>
- Beznosov, A., Sharma, R., Mishra, A., and Amritkar, R. (2022). AI and big data in nuclear power plant operation and maintenance. *Nuclear Engineering and Technology*, 54(10), 3605–3614. <https://doi.org/10.1016/j.net.2022.06.015>
- Butarbutar, S. L., Sanguanmith, S., Meesungnoen, J., **Sunaryo, G. R.**, & Jay-Gerin, J.-P. (2014). Calculation of the yields for the primary species formed from the radiolysis of liquid water by fast neutrons at temperatures between 25–350°C. *Radiation Research*, 181(6), 659–665. <https://doi.org/10.1667/RR13638.1>

- Butarbutar, S. L., **Sunaryo, G. R.**, Kusumastuti, R., and Meesungnoen, J. (2017). *Low-linear energy transfer* radiolysis of supercritical water at 400°C: Density dependence of the G($\bullet$ OH). Sigma Epsilon-Buletin Ilmiah Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir.
- Butarbutar, S. L., Kusumastuti, R., Subekti, M., and **Sunaryo, G. R.** (2018). Modelling the radiolysis of RSG-GAS primary cooling water. Journal of Physics: Conference Series, 962, 012055. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012055>
- Electric Power Research Institute (EPRI). (2006). Water chemistry guidelines for nuclear power plants.
- Electric Power Research Institute (EPRI). (2020). Advanced water chemistry control for small modular reactor systems.
- Fuller, A., Fan, Z., Day, C., and BarLow, C. (2020). *Digital twin: Enabling technologies, challenges and open research*. IEEE Access, 8, 108952–108971. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2998358>
- Huang, Q., Peng, S., Deng, J., Zeng, H., Zhang, Z., Liu, Y., & Yuan, P. (2023). A review of the application of artificial intelligence to nuclear reactors: Where we are and what's next. *Heliyon*, 9(3), e13883. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e13883>
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2006). Fundamental Safety Principles. IAEA Safety Fundamentals No. SF-1. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency. (2006). Data Processing Technologies and Diagnostics for Water Chemistry and Corrosion Control in Nuclear Power Plants (DAWAC): *Report of a Coordinated Research Project 2001–2005*. IAEA-TECDOC-1505. Vienna: International Atomic Energy Agency. ISBN 92-0-107906-0.

- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2009). Predisposal Management of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 5. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2010). Interface Between Safety and Security at Nuclear Power Plants. IAEA Nuclear Energy Series No. NP-T-1.8. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency. (2011). Disposal of Radioactive Waste. IAEA Safety Standards Series No. SSR-5. Vienna: International Atomic Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency. (2016). Safety of Nuclear Power Plants: Design. IAEA Safety Standards Series No. SSR-2/1 (Rev. 1). Vienna: International Atomic Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2020). Water chemistry in nuclear power plants.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2021). Advances in reactor water chemistry and corrosion control.
- International Atomic Energy Agency (IAEA). (2022). Application of digital technologies in nuclear water chemistry (*IAEA TECDOC 1926*).
- International Atomic Energy Agency. (2025). Innovation, Advances and Developments in the Water Chemistry of Pressurized Water Reactors. IAEA-TECDOC-2099. Vienna: International Atomic Energy Agency. <https://doi.org/10.61092/iaea.xe82-olj0>
- Jay-Gerin, J.-P. (2025). Fundamentals of water radiolysis. Encyclopedia, 5, 38. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia5010038>
- Katsumura, Y., **Sunaryo, G. R.**, Hiroishi, D., and Ishigure, K. (1998). Fast neutron radiolysis of water at elevated temperatures relevant to water chemistry. Progress in Nuclear Energy, 32(1–2), 113–121. [https://doi.org/10.1016/S0149-1970\(97\)00011-5](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(97)00011-5)

- Kim, J. H., Cho, Y. H., and Lee, C. J. (2020). Review on lifetime extension strategies for nuclear power plants. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 57(4), 361–370. <https://doi.org/10.1080/00223131.2020.1722073>
- Kinoshita, N., Sueki, K., Sasa, K., Kitagawa, J., Ikarashi, S., Nishimura, T., Wong, Y.-S., Satou, Y., Handa, K., Takahashi, T., Sato, M., and Yamagata, T. (2011). Assessment of individual radionuclide distributions from the Fukushima Daiichi nuclear power plant accident. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108(49), 19526–19529. <https://doi.org/10.1073/pnas.1111729108>
- Le Caër, S. (2011). Water radiolysis: Influence of oxide surfaces on H₂ production under ionizing radiation. *Water Research*, 45(9), 2655–2670. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.02.002>
- Lin, C. C. (2000). The Role of Zinc Injection in PWR Primary Coolant Chemistry. EPRI Report 1000605. Electric Power Research Institute. <https://doi.org/10.2172/769246>
- Lister, D. H., & Uchida, S. (2015). Determining water chemistry conditions in nuclear reactor coolants. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 52(4), 451–466. <https://doi.org/10.1080/00223131.2014.973460>
- Missiaggia, M. (2024). On the radiation quality characterization in radiation therapy: from linear energy transfer to experimental microdosimetry. *The European Physical Journal Plus*, 139, Article 625. <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-05318-5>
- NRC (U.S. Nuclear Regulatory Commission). (1980). TMI-2 Accident Evaluation Program: Reactor Coolant System Chemistry (NUREG-0612).
- Park, J. H., Lee, C. Y., & Kim, M. Y. (2022). Real-time monitoring of coolant chemistry using integrated optical sensors in advanced reactors. *Nuclear Engineering and Design*, 389, 111715.

- Rasheed, A., San, O., & Kvamsdal, T. (2020). Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective. *IEEE Access*, 8, 21980–22012. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2970143>
- Saenko, V. A., Thomas, G., Yamashita, S., & Ohba, T. (2011). Radiation exposure, contamination, and protection: Lessons from the Fukushima nuclear accident. *Journal of Radiation Research*, 52(5), 431–446. <https://doi.org/10.1269/jrr.11066>
- Shoji, T. (2010). Corrosion challenges in nuclear power plants. *Corrosion Reviews*, 28(3-4), 177–222. <https://doi.org/10.1515/CRRE.2010.003>
- Sriyono, **Sunaryo, G. R.**, Widodo, S., and Haryadi, C. (2018). Sriyono, Kusumastuti R., Butarbutar S.L., Febrianto, Pancoko M., Setiadipura T., **Sunaryo G.R.** (2018). The Temperature Dependence Analysis of Carbon Monoxide Conversion on CuO Bed of RDE Helium Purification System. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1493**, 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1493/1/012005>
- Sriyono, **Sunaryo, G. R.**, Widodo, S., and Haryadi, C. (2019). Sriyono, Kusumastuti R., Butarbutar S.L., Salimy D.H., Febrianto, Irianto I.D., Pancoko M., **Sunaryo G.R.** (2019), Analysis of hydrocyclone as river water pre-treatment for tertiary coolant of RDE. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1198, 022040. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/2/022040>
- Sriyono, Saprudin D., Rafi M., **Sunaryo G.R.**, Setiawan A., and Hendro (2022). Medium Activity Liquid Radwaste Treatment by Using Ion Exchange, e 9th International Conference of the Indonesian Chemical Society ICICS 2021, by AIP Publishing. 978-0-7354-4380-8 *AIP Conference Proceedings*, 2638, 030003. <https://doi.org/10.1063/5.0104020>, Published Online: 18 August 2022.
- Sunaryo G.R.**, Katsumura Y., Hiroishi D., Ishigure K. (1995). Radiolysis of water at elevated temperatures-II. Irradiation with γ -rays and fast neutrons up to 250° C. *Radiation Physics and Chemistry*, 45(1), 131-139. [https://doi.org/10.1016/0969-806X\(94\)E0005-4](https://doi.org/10.1016/0969-806X(94)E0005-4)

- Sunaryo G.R.** (2000). The effect of boric acid on radiolysis product of hydrogen peroxide when irradiated by γ -ray. *Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems*, 1, 272-274.
- Sunaryo G.R.** and Domae M. (2008). Numerical simulation on effect of methanol addition on coolant radiolysis in pressurized water reactor. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 45 (12), 1261-1274. <https://doi.org/10.1080/18811248.2008.9711914>
- Sunaryo G.R.**, Meesungnoen J, Gerin J.P.J. (2011). Monte-Carlo Simulation of γ -ray and Fast Neutron Radiolysis of Liquid Water and 0.4 M H_2SO_4 Solutions at Temperatures up to 325°C. *Atom Indonesia*, 37(1), 29-35.
- Sunaryo G.R.**, Sander H., Wisnubroto D.S. (2017). Water Chemistry Management toward Corrosion for Secondary Cooling Piping of Multi Purpose Reactor GA Siwabessy Indonesia. *International Journal of Research Engineering and Science*, 3(6), 56-59.
- Sunaryo, G. R.** (2017). Boric acid radiolysis in primary coolant water of PWR at temperature of 250°C. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 19(1), 11–20. <https://doi.org/10.17146/jpen.2017.19.1.3192>
- Sunaryo G.R.**, Santoso M.I., Kusumastuti R., Wisnubroto D.S., and Sriyono (2024). An in-depth four-year investigation into corrosion of carbon steel materials in the secondary cooling piping of the 30 MW RSG GAS research reactor. *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 13(2), 853. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2024-13-2-11>
- Sunaryo, G. R.**, Kusumastuti R., Wisnubroto D.S., Butarbutar S.L., Sriyono, Jatmiko D.T., (2025). Durability Study of AlMg2 in high-purity cooling water: A 15-year case from the RSG-GAS nuclear reactor. *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 14 (2), 962-979. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2025-14-2-27>
- Tatsujiro Suzuki. 2010. Nuclear Energy Sustainability and the 3S Concept: Safety, Security and Safeguards. *Journal of Nuclear Materials Management*, 38(3), 18–24.

- Tibaoui, R., Sanchez, A., Grasteau, S., & Lamadie, F. (2019). Use of on-line monitoring techniques for early detection of coolant chemistry anomalies in nuclear systems. *Annals of Nuclear Energy*, 135, 106953.
- Yu, K., Wang, Y., & Chen, D. (2021). Integration of AI and big data for anomaly detection in nuclear power plant operations. *Annals of Nuclear Energy*, 157, 108238. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108238>
- Zhang, H., & Pei, J. (2022). A *digital twin* framework for nuclear reactor monitoring and fault prediction. *Annals of Nuclear Energy*, 172, 109025. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109025>.
- Zhang, L., Li, X., & Wang, F. (2021). Effect of nanostructured coating on corrosion resistance of nuclear fuel cladding in simulated primary coolant. *Corrosion Science*, 190, 109658. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.109658>
- Zhao, X., Kim, J., Warns, K., Wang, X., Ramuhalli, P., Cetiner, S. M., Kang, H. G., & Golay, M. W. (2021). Prognostics and health management in nuclear power plants: An updated method-centric review with special focus on data-driven methods. *Frontiers in Energy Research*, 9, 696785. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2021.696785>

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

Karya Tulis Ilmiah

- | | | |
|----|-------------------------|---------|
| 1. | Buku Nasional | 1 buah |
| 2. | Jurnal Internasional | 75 buah |
| 3. | Jurnal Nasional | 23 buah |
| 4. | Prosiding Internasional | 7 buah |
| 5. | Prosiding Nasional | 17 buah |

Kekayaan Intelektual

- | | | |
|----|-------------------|--------|
| 6. | Paten Nasional | |
| | a. Terdaftar | 4 buah |
| | b. Tersertifikasi | 5 buah |

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

Buku Nasional

1. Irianto I.D., Pane J.S., Sunaryo G.R., Sembiring T.M., Purwadi M.D., Suwoto, Sumijanto, Zuhair, Sriyono, Adrial H., Hafid A., Sudarmono, Huda N., Sudadiyo S., Kusumastuti R. Desain Konseptual Reaktor Berpendingin Gas Temperatur Tinggi 200MW Termal, 2018. ISBN 978-602-5610-66-0

Jurnal Internasional

2. Bakhri S., Sumarno E., Himawan R., Akbar T.Y., Subekti M., **Sunaryo G.R.** (2018). Preliminary Development of Online Monitoring Acoustic Emission System for the Integrity of Research Reactor Components. *Journal of Physics: Conference Series*, 962(1), 012064. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012064>
3. Butarbutar S.L., Sanguanmith S., Meesungnoen J., **Sunaryo G.R.** (2014). Calculation of the yields for the primary species formed from the radiolysis of liquid water by fast neutrons at temperatures between 25–350 C. *Radiation research*, 181 (6), 659-665. <https://doi.org/doi:10.1667/RR13638.1>
4. Butarbutar S.L., **Sunaryo G.R.**, Meesungnoen J., Jay-Gerin J-P. (2018). Temperature Dependence of the Primary Species Yields of Liquid Water Radiolysis by 0.8-MeV Fast Neutrons”, *Atom Indonesia*, 42(1), 13. <https://doi.org/10.17146/aij.2016.473>
5. Butarbutar S.L., Kusumastuti R., Subekti M., **Sunaryo G.R.**, (2018). Modelling the radiolysis of RSG-GAS primary cooling water. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 962, 012055. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012055>

6. Deswandri, Subekti M. and **Sunaryo G.R.** (2018). Reliability Analysis of RSG-GAS Primary Cooling System to Support Aging Management Program. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 962, 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012002>
7. Dibyo S., **Sunaryo G.R.**, Bakhri S., Irianto I.D., Zuhair and Irianto I.D. (2018). Analysis on Operating Parameter Design to Steam Methane Reforming in Heat Application RDE. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 962, 012052. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012052>
8. Febrianto, Sriyono, Widodo S., **Sunaryo G.R.** (2018). The effect of zinc injection on the increasing of Inconel 600 TT corrosion resistances. *Journal of Physics: Conf. Series*, 962, 012049. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012049>
9. Febrianto, Sriyono, Hastuti E.P. and **Sunaryo G.R.** (2019). Study on Pitting Corrosion of AlMg2 in Solution Containing Chloride. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1198, 022061. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/2/022061>
10. Hamzah A., AR Suwoto, Adrial H., Bakhri S., **Sunaryo G.R.**, “Neutron fluence and DPA rate analysis In pebble-bed HTR reactor vessel using MCNP”, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 2018, 135–198, 2018. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012044>
11. Hastuti E.P., Surip W. Widodo, Isnaini, M.D., **Sunaryo G.R.**, Syaiful B., (2018). Determining Coolant Flow Rate Distribution In The Fuel-Modified TRIGA Plate Reactor. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 962, 012045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012045>
12. Himawan R. Haryanto M., Subekti M., **Sunaryo G.R.**, (2018). Ultrasonic Non-Destructive Prediction of Spot Welding Shear Strength. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 962, 012047. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012047>

13. Husnayani I., Udiyani P.M., Bakhri S., **Sunaryo G.R.** (2018). Kr-85m activity as burnup measurement indicator in a pebble bed reactor based on ORIGEN2. 1 Computer Simulation. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 962, 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012005>
14. Irianto I.D., S Dibyo, Bakhri S., **Sunaryo G.R.** (2018). Cooling Performance Analysis of The Primary Cooling System Reactor TRIGA-2000 Bandung. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 962, 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012033>
15. Irianto I.D., Sriyono, Kusumastuti R., Santoso K., Subiyah H., Citra A., Dibyo S., Zuhair, Bakhri S. and **Sunaryo G.R.** (2019). Effect of Superheated Steam Pressure on the Performance of RDE Energy Conversion System. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 1198, 022045. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/2/022045>
16. Ishigure K., Katsumura Y., **Sunaryo G.R.**, Hiroishi D. (1995). *Radiation Physics and Chemistry*, 46(4-6), 557–560. [https://doi.org/10.1016/0969-806X\(95\)00217-L](https://doi.org/10.1016/0969-806X(95)00217-L)
17. Isnaini D., Deswandri, **Sunaryo G.R.** (2017). Channel Analysis of Operation Power Fluctuation For AP1000 Reactor. International Conference on Nuclear Technologies and Sciences (ICoNETS). <https://www.semanticscholar.org/paper/Channel-Analysis-Of-Operation-Power-Fluctuation-Isnaini-Deswandri/360c67d739c272123150f98679365a5f8f40348c>
18. Katsumura, Y., Shirai, I., and **Sunaryo, G. R.** (1994). Fundamental processes in water radiolysis under reactor relevant conditions. *Radiation Physics and Chemistry*, 44(3), 273–280. [https://doi.org/10.1016/0969-806X\(94\)00017-2](https://doi.org/10.1016/0969-806X(94)00017-2)
19. Katsumura Y., **Sunaryo G.R.**, Hiroishi D., Ishigure K. (1995). Radiolysis of water at elevated temperatures with γ -rays and fast neutrons. JAERI Conf 95-003, 199–203, 1995. INIS-mf-14648. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/177905>

20. Katsumura Y., **Sunaryo G. R.**, Hiroishi, D., Ishigure K. (1998). Fast neutron radiolysis of water at elevated temperatures relevant to water chemistry. *Progress in Nuclear Energy*, 32(1–2), 113–121. [https://doi.org/10.1016/S0149-1970\(97\)00011-5](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(97)00011-5)
21. Kuntjoro S., Setiawan M.B., Adi W.N., Deswandri and **Sunaryo G.R.** (2018). Development a computer codes to couple PWR-GALE output and PC-CREAM input. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 962, 012041. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012041>
22. Kuntoro I., Sriyono, Subekti M., **Sunaryo G.R.**, Rokhim A., Taxwim, Sukmana J. (2019). Overview of the Application of the Specific Safety Requirements to BATAN Research Reactors. *Journal of Physics Conference Series*, 1198(2), 022064. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/2/022064>
23. Rokhmadi, Rachman A.N., Sujarwono, Taryo T. and **Sunaryo G.R.** (2018). Analysis of JKT01 Neutron Flux Detector Measurements In RSG-GAS Reactor Using LabVIEW. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 962, 012043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012043>
24. Rusli A., Titiresmi, Theresia, **Sunaryo G.R.** (1997). Nuclear Desalination for the Petrochemical Complex of the Natuna Project. Conference: International symposium on desalination of seawater with nuclear energy, Taejon (Korea, Republic of), 26-30 May 1997, Nuclear Desalination of Sea Water. Proceedings of an International Symposium, 1997. *CONF-970541-; STI/PUB-1025*. <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/601762>
25. Santoso S., Situmorang J., Bakhri S., Subekti M., **Sunaryo G.R.** (2018). Operator Support System Design for the Operation of RSG-GAS Research Reactor. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 962, 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012006>
26. Setiadipura T., Bakhri S., **Sunaryo G.R.**, Wisnubroto D.S. (2018). Cooling passive safety features of Reaktor Daya Eksperimental. *AIP Conference Proceedings*, 1984(1), 020034, 2018. <https://doi.org/10.1063/1.5046618>

27. Setiadipura T., Suwoto, Zuhair, Bakhri S., **Sunaryo G.R.**, “Power Peaking Effect of OTTO Fuel Scheme Pebble Bed Reactor. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **962** 012065. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012065>
28. Shiraishi H., **Sunaryo G.R.**, Ishigure K. (1994). Temperature dependence of equilibrium and rate constants of reactions inducing conversion between hydrated electron and atomic hydrogen. *The Journal of Physical Chemistry*, 98(19), 5164–5173. <https://doi.org/10.1021/J100070A037>
29. Sony Tjahyani D.T., **Sunaryo G.R.** (2018). Probabilistic analysis on the failure of reactivity control for the PWR. *J. Phys.: Conf. Ser.* **962** 012046. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012046>
30. Sriyono, Kusumastuti R., Bakhri S., **Sunaryo G.R.** (2018). Analysis of helium purification system capability during water ingress accident in RDE. *Journal of Physics: Conference Series*, **962** (1), 012034. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012034>
31. Sriyono, Kusumastuti R., Butarbutar S.L., Febrianto, Pancoko M., Setiadipura T., **Sunaryo G.R.** (2018). The Temperature Dependence Analysis of Carbon Monoxide Conversion on CuO Bed of RDE Helium Purification System. *J. Phys. Conf. Ser.*, **1493**, 012005. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1493/1/012005>
32. Sriyono, Kusumastuti R., Butarbutar S.L., Salimy D.H., Febrianto, Irianto I.D., Pancoko M., **Sunaryo G.R.** (2019), Analysis of hydrocyclone as river water pre-treatment for tertiary coolant of RDE. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **1198**, 022040. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1198/2/022040>
33. Sriyono, Kusumastuti R., Hafid A., Salimy D.H., Pancoko M., Irianto I.D., Subekti M., Febrianto, and **Sunaryo G.R.** (2019). Temperature profile analysis on cryogenic activated carbon column of helium purification testing facility. *AIP Conference Proceedings*, **2180**, 020046. <https://doi.org/10.1063/1.5135555>

34. Sriyono, Kusumastuti R., Djati Hoesen Salimy, Irianto I.D., Butarbutar S.L., Hafid A., Setiadipura T., **Sunaryo G.R.**, Endiah P. Hastuti and Subekti M. (2021). The Peluit Heat Utilization for Low-Rank Coal Upgrading, *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 11(6), 2356–2362. <https://doi.org/10.18517/ijaseit.11.6.14781>
35. Sriyono, Saprudin D., Rafi M., **Sunaryo G.R.**, Setiawan A., and Hendro (2022). Medium Activity Liquid Radwaste Treatment by Using Ion Exchange, e 9th International Conference of the Indonesian Chemical Society ICICS 2021, by AIP Publishing. 978-0-7354-4380-8 *AIP Conference Proceedings*, 2638, 030003. <https://doi.org/10.1063/5.0104020>, Published Online: 18 August 2022.
36. Sriyono, Kusumastuti R, Butar-Butar S.L., Luhur N., Muslimu F.A., **Sunaryo G.R.**, Irianto I.D., Salimy D.H., Hastuti E.P. and Subekti M. (2022). The Airborne Radioactivity Measurement Profile of Multipurpose Research Reactor G.A. Siwabessy. *AIP Conference Proceedings*, 2501, 020007. <https://doi.org/10.1063/5.0095422>
37. Sriyono, Saprudin D., Rafi M., **Sunaryo G.R.**, Luhur N. and Muslimu F.A. (2023). Identification and tracing of radionuclides in low and medium-activity liquid radwaste sources of G.A. Siwabessy reactor. *Kerntechnik*. <https://doi.org/10.1515/kern-2022-0113>
38. Subekti M., Bakhri S., **Sunaryo G.R.**, The simulator development for RDE reactor. *J. Phys.: Conf. Ser.*, **962** 012054. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012054>
39. Sudadiyo S., SA Santa, Subekti M., **Sunaryo G.R.**, Busono P. (2020). FMEA for maintenance criterion at RSG-GAS reactor implemented on JE01-AP01 primary pump. *Kerntechnik*, 85(3), 153–160. <https://www.degruyterbrill.com/document/doi/10.3139/124.110969/html>

40. Sudarmono, Bakhri S., **Sunaryo G.R. (2018)**. Steady State Temperature Distribution Investigation of HTR Core. *J. Phys.: Conf. Ser.* , **962** 012040. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012040>
41. Sun J., Li Z., Li C., Sui Z., Yan H., Qi W., Ren X., Sun Y, Setiadipura T., Bakhri S., Subekti M., Deswandri, Taryo T., **Sunaryo G.R.** and Wisnubroto D.S. (2002). Progress of Establishing the China-Indonesia Joint Laboratory on HTGR. *Nuclear Engineering and Design*, 397, 111959. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2022.111959>
42. **Sunaryo G.R.**, Katsumura Y., Shirai I., Hiroishi D., Ishigure K. (1994). Radiolysis of water at elevated temperatures-I. Irradiation with gamma-rays and fast neutrons at room temperature. *Radiation Physics and Chemistry*, 44(3), 273–280. [https://doi.org/10.1016/0969-806X\(94\)90005-1](https://doi.org/10.1016/0969-806X(94)90005-1)
43. **Sunaryo G.R.**, Katsumura Y., Hiroishi D., Ishigure K. (1995). Radiolysis of water at elevated temperatures-II. Irradiation with γ -rays and fast neutrons up to 250° C. *Radiation Physics and Chemistry*, 45(1), 131–139. [https://doi.org/10.1016/0969-806X\(94\)E0005-4](https://doi.org/10.1016/0969-806X(94)E0005-4)
44. **Sunaryo G.R.** Katsumura Y., Ishigure K. (1995). Radiolysis of water at elevated temperatures-III. Simulation of radiolytic products at 25 and 250° C under the irradiation with γ -rays and fast neutrons. *Radiation physics and chemistry*, 45(5), 703–714. [https://doi.org/10.1016/0969-806X\(94\)00084-W](https://doi.org/10.1016/0969-806X(94)00084-W)
45. **Sunaryo G.R.**, Febrianto, Sumijanto, Ismuntoyo R.P.H. (1995). Application of high temperature reactor (HTR) in securing the water supplies. *Proceeding Seminar on HTR technology and application II, Jakarta*, 19–20. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_0923_scr.pdf

46. **Sunaryo G.R.**, Rusli A., Nurdin M., Prawiranata H. (1997). Prospect on desalination by using nuclear energy in Indonesia. https://innis.iaea.org>collection>_Public file:///C:/Users/PTKRN/Downloads/28031539.pdf
47. **Sunaryo G.R.** (2000). The effect of boric acid on radiolysis product of hydrogen peroxide when irradiated by gamma-ray. *Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems*, 1, 272–274.
48. **Sunaryo G.R.**, Antariksawan A.R., Widodo S. (2001). The need for training in the desalination industry. *Desalination*, 141 (2), 157–167, 2001.
49. **Sunaryo G.R.**, Sriyono, Lestari D.E. (2007). Water chemistry surveillance for multipurpose reactor 30MW GA Siwabessy, Indonesia. *IAEA Proceeding International Conference on Research Reactors*, S-56.
50. **Sunaryo G.R.** (2007). Prospect on Desalination and Other Non-Electric Applications of Nuclear Energy In Indonesia. *Atom Indonesia*, 33(1), 33–45. <https://doi.org/10.17146/aij.2007.106>
51. **Sunaryo G.R.** and Domae M. (2008). Numerical simulation on effect of methanol addition on coolant radiolysis in pressurized water reactor. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 45 (12), 1261–1274. <https://doi.org/10.1080/18811248.2008.9711914>
52. **Sunaryo G.R.**, Wisnubroto D.S. (2009). Wet Interim Storage of Research Reactor Spent Fuel in Indonesia. *IAEA, International Atomic Energy Agency (IAEA)*, 2009. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/Pub1592_web.pdf
53. **Sunaryo G.R.**, Meesungnoen J, Gerin J.P.J. (2011). Monte-Carlo Simulation of γ -ray and Fast Neutron Radiolysis of Liquid Water and 0.4 M H_2SO_4 Solutions at Temperatures up to 325°C. *Atom Indonesia*, 37(1), 29–35.

54. **Sunaryo G.R.** (2015). Development of nuclear power programme in Indonesia. *5th Nuclear Power Asia Summit, Kuala Lumpur, Malaysia*.
55. **Sunaryo G.R.**, Butarbutar S.L. (2016). The Effect Of Hydrazine Addition on The Formation Of Oxygen Molecule By Fast Neutron Radiolysis. *International Conference on Nuclear Energy Technologies and Sciences*, 155-162, <https://doi.org/10.18502/ken.v1i1.471>
56. **Sunaryo G.R.**, Sander H., Wisnubroto D.S. (2017). Water Chemistry Management toward Corrosion for Secondary Cooling Piping of Multi Purpose Reactor GA Siwabessy Indonesia. *International Journal of Research Engineering and Science*, 3(6), 56–59.
57. **Sunaryo, G. R.**, Kusumastuti, R. and Sriyono (2021). Corrosion surveillance program for tank, fuel cladding and supporting structure of 30 MW Indonesian RSG GAS research reactor. *Kerntechnik*, 86(3), 236-243. <https://doi.org/10.1515/kern-2020-0083>.
58. **Sunaryo G. R.**, Bakhri S., Subekti M., Setiadipura T. and Wisnubroto D.S. (2021). RDE Design Strategy for Indonesia Experimental NPP, The 2nd International Conference on Energy Sciences (ICES). *Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing*, 2048 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2048/1/012002>.
59. **Sunaryo G.R.**, Jatmiko D.T., Hastuti E.P., Surbakti T, Butarbutar S.L., Sriyono, Kusumastuti R.(2023). Lesson Learned First Periodic Safety Review for RSG GAS 30 MW Indonesia (2023). *Proceeding of European Research Reactor Conference 2023, Antwerp 16-20 April 2023, RRFM2023-A0005, Parallel session III: Operations & Maintenance I*, <https://www.euronuclear.org/scientific-resources/conference-proceedings/>

60. **Sunaryo G.R.**, Santoso M.I., Kusumastuti R., Wisnubroto D.S., and Sriyono (2024). An in-depth four-year investigation into corrosion of carbon steel materials in the secondary cooling piping of the 30 MW RSG GAS research reactor. *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 13(2), 853. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2024-13-2-11>
61. **Sunaryo G.R.**, Kusumastuti R., Wisnubroto D.S., Butar butar S.L., Sriyono, Jatmiko D.T. (2025). Durability study of AlMg2 in high purity cooling water: A 15-year case from the RSG-GAS nuclear reactor, *Int. J. Corros. Scale Inhib.*, 2025, **14**, no. 2, 962–979. <https://doi.org/10.17675/2305-6894-2025-14-2-27>
62. Susilo J., Suparlina L., **Sunaryo G.R.**, Deswandri (2018). The change of radial power factor distribution due to RCCA insertion at the first cycle core of AP1000. *J. Phys.: Conf. Ser.* 962 012031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012031>
63. Suwoto, Hamzah A., Zuhair S.B., **Sunaryo G.R.** (2018). Neutron dose rate analysis on HTGR-10 reactor using Monte Carlo code. *Journal of Physics: Conference Series*, 962(1), 012029. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012029>
64. Syaiful B., Yulanda E.A., Subekti M., Taryo T., **Sunaryo G.R.** and Segeng (2021). Preliminary Development of Online Remote Multipurpose Reactor Monitoring System. *Journal of Physics: Conference Series, IOP Publishing*, 1772, 012043. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1772/1/012043>
65. Tipayamontri, T., Sanguanmith, S., Meesungnoen, J., **Sunaryo, G.R.** and Jay-Gerin, J.-P. (2009). Fast neutron radiolysis of the ferrous sulfate (Fricke) dosimeter: Monte Carlo simulations. *Recent Res. Dev. Phys. Chem.*, 10, 143–211. file:///C:/Users/PTKRN/Downloads/neutron%20(1).pdf
66. Udiyani P.M., Husnayani I., Deswandri, **Sunaryo G.R.** (2018). Analysis of radiation safety for Small Modular Reactor (SMR) on PWR-100 MWe type. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 962, 012035. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012035>

67. Udiyani P.M., Kuntjoro S., **Sunaryo G.R.**, Susiati H. (2018). Atmospheric dispersion Analysis for Expected Radiation dose due to Normal Operation of RSG-GAS and RDE Reactors. *Atom Indonesia*, 44(3), 115–121. <https://doi.org/10.17146/aij.2018.878>
68. Widodo S., Rohanda A., Subekti M., Setiadipura T., Bakhri S., **Sunaryo G.R.** (2018). Study RELAP5 Helium Properties for HTGR Thermal Hydraulic Analysis, *Journal of Physics: Conference Series*, 962, 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012039>
69. Wisnubroto D.S., **Sunaryo G.R.**, Sumarbagiono R., Pratama H.A. (2023). Options for the future of the Bandung research reactor. *Proceeding of European Research Reactor Conference 2023*, RRFM2023-A0007, Parallel session III: Operations & Maintenance I. <https://www.euronuclear.org/scientific-resources/conference-proceedings/>
70. Wisnubroto D.S., **Sunaryo G.R.**, Yariant Susilo S.B., Bakhri S. and Setiadipura T. (2023). Indonesia's experimental power reactor program (RDE). *Nuclear Engineering Design*, 404, 112201. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112201>
71. Wisnubroto D.S., Hermana F., Saptowati H., Utomo, Syaeful H., Sumaryanto A., Satmoko A., Purwadi M.D., Santoso B., Santosa P., **Sunaryo G.R.**, Sunarto S., Rozali B., Cahyono A., Sulisty J.B. (2024). Gamma irradiation pilot project: Enhancing food safety and export quality in Indonesia, *Journal of Infrastructure. Policy and Development*, 4, 8(9), 7661, <https://doi.org/10.24294/jipd.v8i9.7661>
72. Wisnubroto D.S., **Sunaryo G.R.**, Susilo Y.S.B. (2025). Indonesia's RDE program: A multifaceted approach to nuclear energy development encompassing human Resource building, public acceptance, and technological innovation, *Nuclear Engineering and Technology*, 57(8). <https://doi.org/10.1016/j.net.2025.103560>

73. Zuhair, Suwoto, Setiadipura T., Bakhri S., **Sunaryo G.R.** (2018). Study on characteristic of temperature coefficient of reactivity for plutonium core of pebbled bed reactor. *Journal of Physics: Conference Series* 962, 1, 012058. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012058>
74. Charlena C., Cahya N.K., Sriyono, Merita, Wisnubroto D.S., **Sunaryo G.R.**. Sustainable Zeolite-Graphene Oxide (ZGO) Oxide from Coal Fly Ash and Coconuts Fiber for Efficient Cesium Removal from Radioactive Waste Water. In Organic Chemistry Communication. <https://doi.org/10.1016/j.inoche.2025.115797>
75. Sriyono, Sutriah K., Wisnubroto D.S., **Sunaryo G.R.**, Ali N.M., Iswantini D. Arc Plasma Synthesized Graphene Oxide from Coconut Fiber: A Green Adsorbent for Co-60 and Cs-137 Removal from Nuclear Liquid Waste. *Chemistry Select*, 2026; 11: e06177. <https://doi.org/10.1002/slct.202506177>
76. **Sunaryo G.R.**, Kusumastuti K., Wisnubroto D.S., Sriyono, Jatmiko D.T., F.Y. Sulisty F.Y., Luhur N. Configuration-Dependent Galvanic Corrosion of Carbon Steel in Inhibitor-Treated Cooling Water: Evidence from Long-Term Service Exposure. *International Journal Corrosion Science and Inhibition (IJCSI)*. 2026. Accepted.

Jurnal Nasional

77. Agustin C., Romli M., Butarbutar S.L., Kusumastuti R., Sriyono, **Sunaryo G.R.** (2018). Studi Radiolisis Air Ringan dan Pengukuran Laju Dosis Bahan Bakar Terhadap Jarak Sumber Radiasi Pada Kolam Penyimpanan Bahan Bakar Bekas (ISSF). *SIGMA EPSILON-Buletin Ilmiah Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir* 22 (2), 50-55, 2018. <http://dx.doi.org/10.17146/sigma.2018.22.2.4488>

78. Alimah S., Ariyanto S., Dewita E., Budiarto B., **Sunaryo G.R.** (2009). Pemilihan Teknologi Desalinasi Nuklir di Provinsi Kalimantan Timur”, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir* 11 (1). <https://doi.org/10.17146/jpen.2009.11.1.1427>
79. Butarbutar S.L., **Sunaryo G.R.** (2011). Analisis Mekanisme Pengaruh Inhibitor Siskem Pada Material Baja Karbon”, *epsilon*, 559-566.
80. Butarbutar S. L., Sriyono, and **Sunaryo G. R.** (2017). Temperature Dependence of Primary Species G (values) Formed from Radiolysis of Water by Interaction of Tritium β – Particles. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 19 (1), 17–23. <https://media.neliti.com/media/publications/139303-temperature-dependence-of-primary-specie-73f594f9.pdf>
81. Butarbutar S.L., **Sunaryo G.R.**, Meesungnoen J., Jay-Gerin J-P. (2017). Low-Linear energy transfer Radiolysis of Supercritical Water At 400° C: Density Dependence of The G ($\bullet$ OH). *Sigma Epsilon-Buletin Ilmiah Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir* 20 (2).
82. Febrianto, Sriyono and **Sunaryo G. R.** (2018). Analysis on AlMg2 as RSG GAS cladding material corrosion in chloride containing water. *Ganendra Journal of Nuclear Science and Technology*, 21 (2), 83-88. <https://media.neliti.com/media/publications/267228-analysis-on-almg2-as-rsg-gas-cladding-ma-df961716.pdf>
83. Febrianto,, **Sunaryo, G. R.**, and Haryadi, C. (2019). Study of corrosion behavior on secondary cooling system piping material in GA Siwabessy reactor. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir TRI DASA MEGA*, 21(2), 61–68. <https://doi.org/10.17146/tdm.2019.21.2.5212>
84. Hartini E., Hastuti E.P., **Sunaryo G.R.**, Saepudin A., Sudadiyo S, Hamzah A. and Susmikanti M. (2022). Prediction of Remaining Useful Life for Components in SSC of RSG GAS Based on Reliability Analysis. *Tri Dasa Mega* Vol. 24 No. 1 (2022) 9–18, <https://doi.org/10.17146/tdm.2022.24.1.6400>.

85. Hastuti E.P., Kuntoro I., Suwoto, Syarip, Basuki P., Surbakti T., **Sunaryo G.R.** and Sudarmono (2021). Map of Radioisotope Production and BATAN Research Reactor Utilization. *Tri Dasa Mega*, 23(3), 105–114. <https://doi.org/10.17146/tdm.2021.23.3.6288>
86. Irianto I.D., S Dibyo, Bakhri S., **Sunaryo G.R.** (2018). Cooling Performance Analysis of The Primary Cooling System Reactor TRIGA-2000 Bandung. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 962, 012033. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/962/1/012033>
87. Kusumastuti R., Lestari D.E., Sriyono, and **Sunaryo G.R.** (2016). Water Chemistry Analysis In RSG-GAS Secondary Cooling System:, *Sigma Epsilon*, 20 (2), 57–63. <https://doi.org/10.17146/sigma.2016.20.2.3513>
88. Saragi E., Hafid A., **Sunaryo G.R.** (2015). Application of MSC-Patran to determine the maximum range support of primary pipes nuclear reactor AP1000”, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir* 17 (1), 1–10. <https://doi.org/10.17146/jpen.2015.17.1.2613>
89. Sriyono, Kusumastuti R., S Butarbutar, **Sunaryo G.R.** (2015). Performance Analysis of Helium Inventory Control Of Rgtt200k Cooling System”, *SIGMA EPSILON-Buletin Ilmiah Teknologi Keselamatan Reaktor Nuklir* 19(1). https://www.academia.edu/117120068/Performance_Analysis_of_Helium_Inventory_Control_of_RGTT200K_Cooling_System
90. Sriyono, Kusumastuti R., Butarbutar S.L., Hafid A., **Sunaryo G.R.**, (2016). The Debris Particles Analysis of RSG GAS Coolant to Anticipate Sediment Induced Corrosion”, *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir* 18 (1), 11–21. <https://doi.org/10.17146/jpen.2016.18.1.2675>
91. Sriyono, Setiadipura T., **Sunaryo G.R.**, (2018). Carbon dust in Primary Coolant of RDE: Its Problem and Solution”, *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir Tri Dasa Mega* 20 (2), 89–98. <https://doi.org/10.17146/tdm.2018.20.2.4456>

92. Sudadiyo S., **Sunaryo G.R.** (2017). Thermodynamics Analyses on Regenerative Steam Cycle with Two Tanks for HTGR-10 Concept”, *GANENDRA Journal of Nuclear Science and Technology* 20 (2), 73–81. <https://media.neliti.com/media/publications/177985-EN-thermodynamics-analyses-on-regenerative.pdf>
93. **Sunaryo G.R.** (2012). Mekanisme Reaksi Asam Borat Dengan Produk Radiolisis Akibat Radiasi Sinar- γ Pada Temperatur 25°C. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir* 14(2). <https://media.neliti.com/media/publications/127297-ID-none.pdf>
94. **Sunaryo G.R.** (2012). Prospect on Desalination and Other Non-Electric Applications of Nuclear Energy In Indonesia”. *Atom Indonesia*, Vol 33, No 1, p 33–45. <https://doi.org/10.17146/ajj.2007.106>
95. **Sunaryo G.R.**, Butarbutar S.L. (2016). The Effect of Hydrazine Addition On The Formation of Oxygen Molecule By Fast Neutron Radiolysis”, *KnE Energy* 1 (1), 155–162. <https://doi.org/10.18502/ken.v1i1.471>
96. **Sunaryo G.R.**, (2017). Surveillance Management for Secondary Water Cooling Quality of RSG GAS. *Jurnal Sains dan Teknologi Nuklir Indonesia*, 18(1): 39–47. <https://doi.org/10.17146/jstni.2017.18.1.3214>
97. **Sunaryo G.R.** (2017). Boric Acid Radiolysis in Primary Coolant Water of PWR at Temperature of 250°C. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 19 (1), 11-16. <https://doi.org/10.17146/jpen.2017.19.1.3192> https://www.researchgate.net/publication/318317501_Jurnal_Pengembangan_Energi_Nuklir_Boric_Acid_Radiolysis_in_Primary_Coolant_Water_of_PWR_at_Temperature_of_250_o_C_article_information_abstract#fullTextFileContent
98. **Sunaryo, G. R.** (2017). Corrosion behavior analysis in secondary cooling system components of GA Siwabessy reactor. *Jurnal Teknologi Reaktor Nuklir TRI DASA MEGA*, 19(2), 77–86. <https://doi.org/10.17146/tdm.2017.19.2.4311>

99. Taryo T., Ridwan R., **Sunaryo G.R.**, Rachmawati M.,(2018). The Strategy to Support HTGR fuels for The 10 MW Indonesia's Experimental Power Reactor (RDE). *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir* 24 (1). <https://doi.org/10.17146/urania.2018.24.1.3729>.

Prosiding Internasional

100. **Sunaryo G.R.** and Rusli A (1997). National programmes and activities for nuclear desalination in Indonesia. Conference: International symposium on desalination of seawater with nuclear energy, Taejon (Korea, Republic of), 26-30 May 1997.
101. **Sunaryo G.R.**, Sriyono, Lestari D.E. (2008). Water chemistry surveillance for multi purpose reactor 30MW Ga Siwabessy, Indonesia, IAEA Research reactors: Safe management and effective utilization. Proceedings of IAEA International Conference 2008. ISBN 978-92-0-160108-7. http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/P1360_ICRR_2007_CD/datasets/foreword_home.html; <http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/publications.asp>
102. **Sunaryo G.R.** and Wisnubroto D.S. (2009) Wet Interim Storage of Research Reactor Spent Fuel in Indonesia. Management and Storage of Research Reactor Spent Nuclear Fuel. Proceedings of a Technical Meeting, p 73–78, 2013.
103. **Sunaryo G.R.** (2013). Characteristic Interaction Between γ - Rays and Water on Accelerating The Corrosion Process In Wet Spent Fuel Storage”, RRFM European Research Reactor Conference, 177.
104. **Sunaryo G.R.**, Setianto, Tarigan A, Wisnubroto D. S. (2013). Conference: Joint IGORR 2013 and IAEA Technology Meeting, Daejeon (Korea, Republic of), 13-18 Oct 2013.

105. Khakim A. and **Sunaryo G.R.** (2017). Safety Reevaluation of Indonesian MTR-Type Research Reactor. 18th conference of the International Group on Research Reactors and IAEA workshop on safety reassessment of research reactors in light of the lessons learned from the Fukushima Daiichi accident (J7-TR-54790).
106. **Sunaryo G.R.**, DT Jatmiko D.T., Sriyono, Kusumastuti R., Hastuti E.P., Tukiran Surbakti T. (2023). Lesson learned First Periodic Safety Review for RSG GAS 30MW Indonesia. RRFM European Research Reactor Conference, 2023, ISBN 978-92-95064-39-3

Prosiding Nasional

107. Butarbutar S.L., **Sunaryo G.R.**, Kusumastuti R. (2016). Calculation of O₂ Concentrations Formed From The Radiolysis of PWR Coolant Byg-Rays, Fast Neutrons And Tritium B-Particles. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2016*, Batam, 489–495.
108. Febrianto, **Sunaryo G.R.**, Butarbutar S.L.(2010). Analisis laju korosi dengan penambahan inhibitor korosi pada pipa sekunder reaktor RSG-GAS. *Seminar Nasional VI SDM Teknologi Nuklir Yogyakarta*, 615–620.
109. Kusumastuti R., **Sunaryo G.R.** (2014). Analisis Laju Korosi Material AlMg2 dan SS304 dalam Lingkungan Air Kolam Penyimpanan Bahan Bakar Bekas (ISSF). *Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah*, 78–85.
110. Kusumastuti R., Pramana R., Sriyono, **Sunaryo G.R.** (2015). The use of Morinda Citrifolia as a Green Corrosion Inhibitor for Low Carbon Steel in NaCl Solution. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2015, Denpasar, Bali*, 226–233.
111. Lestari D.E., **Sunaryo G.R.**, Yulianto Y.E., Alibasyah S., Utomo S.B. (2004). Kimia Air Reaktor Riset GA Siwabessy. *Makalah Penelitian P2TRR dan P2TKN BATAN*, 15–21.

112. Saragi E., **Sunaryo G.R.**, Bakhri S.(2017). Preliminary Study To Prediction of Oxidation Graphite Shell Fuel Of Htgr on Atws Condition. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2017, 29–36.
113. Sudadiyo S., Bakhri S., **Sunaryo G.R.** (2017). The Condensing Steam Turbine Case Study For A 10 MWth Experimental Power Reactor”, Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2017, 1–8.
114. Sudarno, Santosa K., Kiswanta, Deswandri, **Sunaryo G.R.** (2017). Development of Analysis Method of Infrared Thermography For Electrical Component Aging Management”, Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2017, 49–56.
115. **Sunaryo G.R.** (1995). Febrianto, Sumijanto, Ismuntoyo R.P.H., “Application of high temperature reactor (HTR) in securing the water supplies”, Seminar on HTR technology and application II, Jakarta, 19–20.
116. **Sunaryo G.R.** (1996). Arifal, Pengaruh asam borat terhadap pembentukan H₂O₂ hasil radiasi sinar-pada temperatur kamar. Prosiding Hasil Penelitian Pusat Penelitian Teknologi Keselamatan Reaktor”, Prosiding.
117. **Sunaryo G.R.** (2010). Aplikasi program Corrosion Surveillance untuk Kolam Penyimpan reaktor RSG_GAS. TKPFN Seminar, Surabaya.
118. **Sunaryo G.R.**, Lestari D.E. Utomo B, (2011). Analisis kandungan mikroba di Pendingin Sekunder RSG-GAS 30MW. Prosiding Pertemuan Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi.
119. **Sunaryo G.R.** (2013). Pengendalian Proses Korosi Pada Sistem Pendingin Sekunder RSG GAS Gas 30mw. Prosiding, 137–146.

120. **Sunaryo G.R.** (2014). Irradiation Impact on Wet Spent Fuel Storage. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir. https://www.researchgate.net/profile/Herry-Poernomo/publication/292971944_tenorm_waste_management_concept_on_the_making_of_zirconium_oxychloride_from_zircon_sand/links/56b3042508ae795dd5c7da3b/tenorm-waste-management-concept-on-the-making-of-zirconium-oxychloride-from-zircon-sand.pdf
121. Susmikanti M., Catur A.S., Souliisa A., Subekti M., **Sunaryo G.R.** (2017). Database System Development for Operational Parameter of RSG-GAS based on web”, Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2017, 39–48.
122. Taryo T. Rokhmadi, Bakhri S., **Sunaryo G.R.** “(2017). The ongoing Progress of Indonesia’s Experimental Power Reactor 10 MW and Its National Research Activities. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2017, 57–68.
123. Taryo T. Rokhmadi, Bakhri S., **Sunaryo G.R.** “(2017). The ongoing Progress of Indonesia’s Experimental Power Reactor 10 MW and Its National Research Activities. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Energi Nuklir 2017, 57–68.

Paten Nasional Tersertifikasi

124. Reaktor Nuklir Kogenerasi tipe Pebble Bed High Temperature Gas Cooled Reactor 10 MWt. (IDP 000079277), 6 Oktober 2021.
125. Tangki Karbon Aktif Kriogenik Penyerap Gas Pengotor Oksigen dan Nitrogen Pada Sistem Purifikasi RDE (IDP 000078831), 31 Agustus 2021.
126. Simulator Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Berdaya 10 MWth (EC00202280520), 28 Oktober 2022.
127. Manipulator (Robot Mekanik) Ultrasonic Scanner untuk Memeriksa Tangki Reaktor Riset Dan Industri (IDP 000087981), 30 Mei 2023.

128. Perangkat Batang Kendali Untuk High Temperature Gas-Cooled Reactor (Htgr) Daya Rendah Tipe Pebble Bed Reactor (PBR) (IDP 000087820), 13 Juni 2023.

Paten Nasional Terdaftar

129. Sistem Pendingin Rongga Reaktor Nuklir Berpendingin Gas Temperatur Tinggi (P00202215604), 28 Desember 2022.
130. Komposisi Pelapis Material Baja Karbon Berbasis Ni-P Ramah Lingkungan dan Metode Pelapisannya Serta Produk Yang Dihasilkannya (P00202410232), 27 September 2024.
131. Proses dekontaminasi zat radioaktif menggunakan grafena oksida pada limbah radioaktif cair (P00202414657), 6 Desember 2024.
132. Metode Sementasi Grafena Oksida Bekas Mengandung Zar Radioaktif Pasca Adsorpsi Beserta Produk Yang Dihasilkannya (P00202512731), 20 Nopember 2025.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. DATA PRIBADI

Nama	: Dr. Geni Rina Sunaryo, M.Sc.
Tempat/Tanggal lahir	: Jakarta, 9 September 1962
Anak ke:	: 1 dari 5 bersaudara
Jenis kelamin	: Perempuan
Nama Ayah Kandung	: Srinindyat Soenaryo
Nama Ibu Kandung	: Suswarinah
Nama Suami	: Prof. Dr. Djarot S. Wisnubroto
Jumlah Anak	: 1 (satu) orang
Nama Anak	Pandu Wisesa Wisnubroto, S.H
Nama Instansi	: Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir
Nama Organisasi	: Organisasi Riset Tenaga Nuklir
Nama Institusi	: BRIN
Bidang Kepakaran	: Keselamatan Reaktor Nuklir
Judul Orasi	: Tata Kelola Kimia Pendingin Reaktor Nuklir Menuju Era PLTN untuk Kemandirian Energi di Indonesia
Ilmu	: Ilmu Teknik Nuklir
Bidang	: Kimia Sistem Pendingin Reaktor
Kepakaran	: Integrasi Radiolisis, Korosi Material, dan Sistem Kimia Prediktif dalam Keselamatan Reaktor Nuklir
No. SK Pangkat Terakhir	: Keputusan Presiden No. 15/K tahun 2024, tanggal 31 Juli 2024

No. SK Jabatan Peneliti : Keputusan Presiden No.39/M tahun
Utama 2020 tanggal 6 Mei 2020
Keputusan Presiden No.3/M tahun
2022
tanggal 19 Januari 2022

Tautan Scopus : [https://sinta.kemdiktisaintek.go.id/
authors/profile/6049540/?view=scopus](https://sinta.kemdiktisaintek.go.id/authors/profile/6049540/?view=scopus)

Tautan Google Scholar : [https://scholar.google.com/
citations?hl=en&user=cuordY4AAAAJ](https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=cuordY4AAAAJ)

B. PENDIDIKAN FORMAL

No.	Jenjang	Nama Sekolah/PT	Kota / Negara	Tahun Lulus
1.	SD	SD Yayasan Perguruan Cikini	Jakarta	1974
2.	SMP	SMP Yayasan Perguruan Cikini	Jakarta	1977
3.	SMA	SMAN 4	Jakarta	1981
4.	B.Sc.	Akademi Kimia Analisis	Bogor	1984
5.	S-2	Tokyo University	Tokyo, Japan	1990
6	S-3	Tokyo University	Tokyo, Japan	1994

C. PENDIDIKAN NON FORMAL

No.	Nama Pelatihan/Pendidikan	Tempat/ Kota/Negara	Tahun
1.	Proteksi Radiasi	Jakarta	1985
2.	Prajabat Golongan II	Jakarta	1986
3.	Kepemimpinan ADUM	Jakarta	1996
4.	Pendidikan dan Pelatihan Kepemimpinan Tingkat II, Angkatan XLI Kelas H	Jakarta	2015
5.	RIKEN, Training on extraction of natural product for anti cancer	Saitama, Japan	1987
6.	RIKEN, Training on extraction of natural product for anti cancer	Saitama, Japan	1987
7.	Kursus Bahasa Jepang di Takusoku University	Tokyo, Japan	1988
8.	Workshop on Nuclear Safety Regulatory Control, IAEA	Jakarta	1996

No.	Nama Pelatihan/Pendidikan	Tempat/ Kota/Negara	Tahun
9.	STA Scientist, research on Radiolysis of High Temperature Water, at NUTEC-JAERI	Tokyo, Japan	2001
10.	IAEA-BATAN Workshop on Remaining Life Studies	Serpong	2001
11.	BATAN-IAEA National Training Course on Ageing Management for Research Reactor	Serpong	2003
12.	National Training Course on the In-service Inspection of Reactor Research, Center for Development of Reactor Research Technology	Serpong	2004
13.	PostDoc., Research Work on 'Theoretical Radiation Chemistry entitled Monte Carlo Simulation', Research Laboratory in the Department of Nuclear Medicine and Radiobiology	Sherbrooke, Quebec, Canada	2005
14.	PostDoc., Research Work on 'Water Chemistry of Supercritical Pressure Water and Computer Simulation of Coolant Radiolysis', at Centreal Research Institute of Electric Power Industry	Kanagawa, Japan	2006
15.	IAEA Training Course on 'Water Quality Management for Research Reactors and Research Reactor Spent Fuel Facilities' - Josef Stefan Institute, Milan Copic Nuclear Training Centre -	Ljubljana , Slovenia	2007
16.	Nuclear Security for Senior Manager	Vienna	2023

Buku ini tidak diperjualbelikan.

D. JABATAN STRUKTURAL

No.	Tahun	Nama Jabatan/ Eselon	Nama Instansi
1.	1999–2001	Kepala Sub Bid. Ilmiah dan Dokumentasi, Pusat Keselamatan Reaktor Nuklir	Batan
2.	2001–2005	Kepala Sub Bid. Kendakan Material, Pusat Keselamatan Reaktor Nuklir	Batan
3.	2012–2014	Kepala Bidang Teknologi dan Keselamatan Reaktor, Pusat Keselamatan Reaktor Nuklir	Batan
4.	2014–2020	Kepala Pusat Teknologi dan Keselamatan Reaktor Nuklir	Batan

E. JABATAN FUNGSIONAL

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1.	Pengangkatan Pertama	1-10-1995
2.	Peneliti Muda	1-6-1997
3.	Peneliti Madya	1-7-1998
4.	Peneliti Madya	1-3-2012
5.	Peneliti Madya Penghentian sementara karena tugas belajar lebih dari 3 bulan	31-7-2006
6.	Peneliti Madya Aktif Kembali	1-12-2006
7.	Peneliti Utama	1-3-2012
8.	Peneliti Ahli Utama Diberhentikan karena aturan tidak boleh rangkap jabatan	31-8-2017
9.	Peneliti Ahli Utama Pengangkatan Aktif Kembali	6-5-2020

F. KEIKUTSERTAAN DALAM KEGIATAN ILMIAH

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
1.	Nuclear Desalination Conference	Penyaji	IAEA, Daejon, Korea	1997
2.	Conference of Supercritical Water Radiolyses	Peserta	Jepang, Tokyo	1998
3.	Desalination European Conference	Penyaji	IAEA, Tunisia, Africa	2000
4.	IAEA, Water Chemistry material Course	Pembuat Module Course	IAEA, Vienna	2005
5.	Nuclear Desalination Conference	Penyaji	Oarai, Japan	2007
6.	Research Reactor Conference under IAEA	Penyaji	Sydney, Australia	2007
7.	TM on Water Chemistry Management for Spent Fuel Storage	Penyaji	IAEA, Thurso, Scotland	2009
8.	Research Reactor Conference under IAEA	Penyaji	IAEA, Rabbat, Morocco	2011
9.	Research Reactor Fuel Management	Penyaji	IAEA, Prague	2012

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
10.	Research Reactor Fuel Management	Penyaji	IAEA, St. Petersburg Center	2013
11.	Research Reactor Fuel Management	Penyaji	IAEA, Ljubljana, Slovenia	2014
12.	IAEA Research Reactor International Conference	Penyaji	IAEA, Vienna	2015
13.	Asian Nuclear Safety Network	Penyaji	IAEA, Vienna	2016
14.	Technical Working Group Gas Cooled Reactor	Penyaji	IAEA, Vienna	2017
15.	Asian Nuclear Safety Network	Penyaji	IAEA, Vienna	2018
16.	ANSN	Penyaji, Perwakilan Indonesia	IAEA, Daejon Korea	2019
17.	Periodic Safety Review	Penyaji	IAEA, ANL, USA	2019
18.	INPRO Dialogue Forum	Penyaji	IAEA, Daejon, Korea	2019
19.	RASCAP	Penyaji	IAEA, Sydney, Australia	2019
20.	Technical Working Group Gas Cooled Reactor	Penyaji	IAEA, Vienna	2019

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
21.	Komisi Penilai Fungsional Peneliti Batan	Anggota	BATAN	2010– 2013
22.	Komisi Pembina Tenaga Fungsional	Ketua	PPTKR-BATAN	1998– 2001 2013
23.	Technical Working Group High Temperature Gas Cooled Reactor (HTGR)	Member	IAEA	2014– 2019
24.	Asia Nuclear Safety Network (ANSN)	Perwakilan Indonesia	IAEA	2014– 2019
25.	Regional Advisory Safety Asia Pacific (RASCAP)	Perwakilan Indonesia	IAEA	2017– 2019
26.	Tim Desain Reaktor Daya Eksperimental	Ketua	Batan	2016– 2019
27.	Join Lab Batan Indonesia dengan Tsinghua University China	ketua	Indonesia - China	2017– 2020
28.	Kelompok Manajemen Penuaan RSG GAS	Ketua	PTKRN-BATAN	2020– 2021

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Nama Kegiatan	Peran/ Tugas	Penyelenggara (Kota, Negara)	Tahun
29.	Ketua Tim reviewer <i>Safety Analysis Report (SAR) PRSG- BATAN</i>	Ketua	BATAN	2014– 2019
30.	Nuclear Asia Business Platform	Penyaji	NABF, Online	2020
31.	Periodic Safety Review	Penyaji	IAEA, online	2020
32.	Stakeholders involvement	Expert	IAEA, Online	2021
33.	HTR 2020	Penyaji	Online	2021
34.	NCBJ Summer School	Invited Lecturer	Poland	2022
35.	RRFM 2023	Penyaji	ENS, Antwerp, Belgium	2023
36.	IAEA SMR Conference	Penyaji	Vienna	2024
37.	IAEA Research Reactor Conference	Penyaji	Vienna	2024
38.	Korea NES	Penyaji	Gyeongju	2024
39.	ATOM EXPO	Penyaji	Sirius, Rusia	2024

G. KETERLIBATAN DALAM PENGELOLAAN JURNAL ILMIAH

No.	Nama Jurnal	Penerbit	Peran/ Tugas	Tahun
1.	Buletin Epsilon	PPTKR-Batan	Redaksi/ Editor/ Ketua Editor	1998–2001
2.	Nuclear Desalination International Journal	International	Editorial Board	2014–2018

H. CAPAIAN DALAM BIDANG IPTEK, RISET, DAN INOVASI

1. Karya Tulis Ilmiah

a) Kualifikasi Karya

No.	Kualifikasi Karya	Jumlah
1.	Buku Internasional	-
2.	Buku Nasional	1
3.	Bagian dari Buku Internasional	75
4.	Bagian dari Buku Nasional	23
5.	Jurnal Internasional	7
6.	Jurnal Nasional	17
7.	Prosiding Internasional	-
8.	Prosiding Nasional	-
9.	Paten Internasional	-
	Terdaftar	-
	Tersertifikasi	-

Buku ini tidak diperjualbelikan.

No.	Kualifikasi Karya	Jumlah
10.	Paten Nasional	
	Terdaftar	4
	Tersertifikasi	5
11.	Perlindungan Varietas Tanaman (PVT)	-
12.	Rumpun atau Galur Hewan/Ikan/Benih Unggul Tanaman Hutan	-
13.	Hak Cipta	-
14.	Desain Industri	-
15.	Desain dan Tata Letak Sirkuit Terpadu	-
16.	Transaksi Lisensi	-

b) Kualifikasi Penulis

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Penulis Tunggal	-
2.	Bersama Penulis Lainnya	-
	Total	-

c) Kualifikasi Bahasa

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1.	Bahasa Indonesia	113
2.	Bahasa Inggris	12
3.	Bahasa Lainnya	-
	Total	125

2. Kekayaan Intelektual

No.	Kualifikasi Karya	Jumlah
1.	Paten Internasional	-
	Terdaftar	-
	Tersertifikasi	-
2.	Paten Nasional	-
	Terdaftar	4
	Tersertifikasi	5
3.	Perlindungan Varietas Tanaman (PVT)	-
4.	Rumpun atau Galur Hewan/Ikan/Benih Unggul Tanaman Hutan	-
5.	Hak Cipta	-
6.	Desain Industri	-
7.	Desain dan Tata Letak Sirkuit Terpadu	-

3. Kerjasama bersama Mitra

No.	Kualifikasi Karya	Jumlah
1.	Transaksi Lisensi	-

I. PEMBINAAN KADER ILMIAH

No.	Nama	PT/Universitas	Peran/Tugas	Tahun
1.	Zander	STTN, Yogya	Pembimbing	2012
2.	Imam	STTN, Yogya	Pembimbing	2013

No.	Nama	PT/Universitas	Peran/Tugas	Tahun
3.	Eni	STTN, Yogya	Pembimbing	2013
4.	Luruh Tyas	UI, Depok	Pembimbing S-2	2014
5.	Rahayu Kusumastuti	UI, Depok	Pembimbing	2015
6.	Sriyono	IPB, Bogor	Pembimbing	2021
7.	Thalita Anisa	UNAS	Pembimbing	2022
8.	Aryo Laksono	UNAS	Pembimbing	2022
9.	Nafisah Amalia	POLTEK Semarang	Pembimbing	2023
10.	Yusi Amalia	POLTEK Semarang	Pembimbing	2023
11.	Sriyono	IPB	Pembimbing S-2	2020– 2022
12.	Sriyono	IPB	Pembimbing S-3	2024– 2026
13.	Dicky	UI	Pembimbing S-3	2025– sekarang

J. ORGANISASI PROFESI ILMIAH

No.	Nama Organisasi	Jabatan	Tahun
1.	Himpunan Peneliti Indonesia (Himpenindo)	Anggota	2017–2021
2.	Himpunan Peneliti Indonesia (Himpenindo) Kota Tangerang Selatan	Anggota	2019–2021

No.	Nama Organisasi	Jabatan	Tahun
3.	Himpunan Peneliti Indonesia (Himpenindo) Provinsi Banten	Dewan Penasehat	2021–2024
4.	Himpunan Masyarakat Nuklir Indonesia	Ketua Divisi Pengembangan Perempuan Nuklir	2018–2031

K. Tanda Penghargaan

No.	Nama Penghargaan	Pemberi Penghargaan	Tahun
1.	Satyalencana Karya Satya X	Presiden RI	1997
2.	Satyalencana Karya Satya XX	Presiden RI	2007
3.	Satyalencana Karya Satya X XX	Presiden RI	2017
4.	Tokoh Nuklir Indonesia	Lembaga Kajian NawaCita	2023

Orasi ilmiah ini membahas tata kelola kimia pendingin reaktor sebagai salah satu fondasi utama keselamatan, keandalan, dan keberlanjutan operasi reaktor nuklir. Berdasarkan rangkaian penelitian selama lebih dari tiga dekade, kajian ini mengintegrasikan aspek fundamental radiolisis air, kinetika reaksi spesies kimia, korosi dan penuaan material, serta pengelolaan sistem pendingin reaktor dalam kondisi operasi nyata. Hasil penelitian mencakup data primer radiolisis air pada temperatur tinggi dan iradiasi neutron cepat, pemodelan kinetika reaksi, serta basis data degradasi material jangka panjang pada sistem pendingin Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy dalam lingkungan tropis Indonesia.

Orasi ini menegaskan perlunya transformasi pengelolaan kimia pendingin dari pendekatan konvensional yang bersifat korektif menuju sistem yang prediktif, adaptif, dan berbasis data. Pendekatan tersebut didukung oleh pemantauan daring, sensor cerdas, kecerdasan buatan, analitik data, dan teknologi digital twin untuk mendeteksi anomali, memprediksi degradasi material, serta mendukung pengambilan keputusan keselamatan secara real-time.

Kontribusi ilmiah ini memberikan landasan bagi penguatan pengelolaan penuaan reaktor, pengembangan regulasi keselamatan berbasis bukti, peningkatan kapasitas sumber daya manusia, serta kesiapan industri pendukung nasional. Dalam konteks pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir dan Small Modular Reactor, penguasaan kimia pendingin reaktor menjadi bagian penting dalam membangun keselamatan nuklir, kemandirian teknologi, kepercayaan publik, dan ketahanan energi Indonesia.

BRIN Publishing
The Legacy of Knowledge

Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Gedung B.J. Habibie Lt. 8,
Jln. M.H. Thamrin No. 8,
Kota Jakarta Pusat 10340
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.3431



ISSN 3090-8485



Buku ini tidak diperjualbelikan.