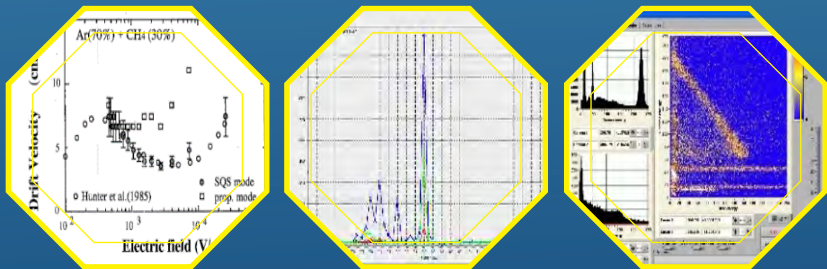


ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET BIDANG FISIKA RADIASI

SISTEM DETEKSI RADIONUKLIDA UNTUK MENDUKUNG TRAKTAT PELARANGAN UJI COBA NUKLIR



OLEH:
SUSILO WIDODO

BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL
JAKARTA, 8 DESEMBER 2022

**SISTEM DETEKSI RADIONUKLIDA
UNTUK MENDUKUNG TRAKTAT
PELARANGAN UJI COBA NUKLIR**

Diterbitkan pertama pada 2022 oleh Penerbit BRIN

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



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

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

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



**ORASI PENGUKUHAN PROFESOR RISET
BIDANG FISIKA RADIASI**

**SISTEM DETEKSI RADIONUKLIDA
UNTUK MENDUKUNG TRAKTAT
PELARANGAN UJI COBA NUKLIR**

**OLEH:
SUSILO WIDODO**

**BADAN RISET DAN INOVASI NASIONAL
JAKARTA, 8 DESEMBER 2022**

© 2022 Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN)
Pusat Riset dan Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir-Organisasi Riset Tenaga Nuklir

Katalog dalam Terbitan (KDT)

Sistem Deteksi Radionuklida untuk Mendukung Traktat Pelarangan Uji Coba Nuklir/Susilo Widodo–Jakarta: Penerbit BRIN, 2022.

xi + 63 hlm.; 14,8 x 21 cm

ISBN 978-623-8052-38-7 (cetak)
978-623-8052-37-0 (*e-book*)

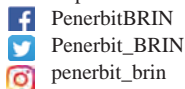
1. Nuklir
2. Radionuklida
3. Detektor

539.7

Copy editor : Anton Winarko
Proofreader : Rina Kamila & Dhevi E.I.R. Mahelingga
Penata Isi : Dhevi E.I.R. Mahelingga
Desainer Sampul : S. Imam Setyawan
Cetakan Pertama : Desember 2022



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie, Jl. M.H. Thamrin No. 8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: 0811-8612-369
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id



BIODATA RINGKAS



Susilo Widodo, lahir di Yogyakarta, 14 April 1958, adalah anak kedua dari Bapak Payar Notowidjarso (alm.) dan Ibu Hj. Suwarsi. Menikah dengan Sri Rahayu dan dikaruniai tiga orang anak, yaitu Wahyu Ramadhanni Umareta, Wahyu Anggoro Chihayanto, dan Nastia Siti Deviena Widodo.

Berdasarkan Keputusan Presiden Republik Indonesia Nomor 3/M Tahun 2022 tanggal 19 Januari 2022 yang bersangkutan diangkat sebagai Peneliti Ahli Utama terhitung mulai tanggal 1 Oktober 2021.

Berdasarkan Keputusan Kepala Badan Riset dan Inovasi Nasional 318/I/HK/2022 tanggal 3 November 2022 tentang Pembentukan Majelis Pengukuhan Profesor Riset, yang bersangkutan dapat melakukan orasi Pengukuhan Profesor Riset.

Menamatkan Sekolah Dasar Negeri I Sentolo, Kulon Progo, Yogyakarta tahun 1970; Sekolah Menengah Pertama Negeri I Sentolo, Kulon Progo, Yogyakarta, tahun 1973; dan Sekolah Menengah Atas Negeri I Yogyakarta, tahun 1976. Memperoleh gelar *bachelor of science* (sarjana muda) pada tahun 1980 dan *doctorandus* pada tahun 1982 dari Jurusan Fisika, Fakultas Ilmu Pasti dan Ilmu Alam, Universitas Indonesia. Gelar *master of engineering* bidang kompetensi *energy conversion engineering* diperoleh pada tahun 1990 dari Graduate School of Engineering Sciences, dan *doctor of engineering* bidang kompetensi *applied nuclear physics* diperoleh pada tahun 1993 dari Faculty of Engineering, keduanya di Kyushu University, Fukuoka, Jepang.

Mulai bekerja sebagai calon pegawai negeri sipil Badan Tenaga Nuklir Nasional (CPNS BATAN) dan ditempatkan di Pusat Dosimetri dan Standardisasi (PDS) sejak tahun 1980, kemudian di Pusat Standardisasi dan Penelitian Keselamatan Radiasi (PSPKR) sejak tahun 1993. Pada tahun 1998, mendapatkan penugasan sebagai *equipment officer* di Provisional Technical Secretariat-Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (PTSCTBTO) di Wina, Austria. Kembali bekerja di BATAN, tepatnya di Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR) sejak tahun 2007, di Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (PSTA) sejak tahun 2014, dan di Pusat Riset dan Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir (PRTKMMN)-ORTN BRIN sejak 2022.

Mengikuti beberapa pelatihan yang terkait dengan bidang kompetensinya, antara lain *Job Training on Radiation Safety and Standardization* di KFA Juelich GmbH (1984–1985), *Metodologi Riset* (1985), *IAEA Training of Trainers on Radiation Detection*, BATAN, Jakarta (1995), *Designing Competencies for Laboratory Personnel: ISO/IEC 17025:2005 Requirements*, Agus Nurhadi Training Inc, Jakarta (2008), *Training on Radiological Emergency Preparedness and Response*, ANSTO, Sydney, Australia (2009), dan *Training Course on Physical Protection and Security Management of Radioactive Sources*, BATAN-ANSTO, Jakarta (2010). Selama penugasan di CTBTO, mendapatkan pelatihan *OSI Table Top Exercise I*, Vienna, Austria (1999), *OSI Experimental Advanced Course Related to the Comprehensive Nuclear-Test Ban Treaty*, France (November 2001), *OSI Field Experiment and Equipment Testing*, Bratislava, Slovakia (September 2001), *OSI Field Experiment, Semipalatinsk Nuclear Test Site*, Kazakhstan (September–Oktober 2002), dan *OSI Directed Exercise 2005 (DE-05)*, *Semipalatinsk Nuclear Test Sites*, Kazakhstan (Juli 2005), dan *OSI Equipment Testing and Evaluation Exercise*, Seibersdorf, Austria (2006).

Pernah menduduki jabatan Kepala Balai Instrumentasi (1994–1995), Kepala Bidang Standardisasi (1995–1998), Kepala Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (2007–2014) dan Kepala Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (2014–2018). Jenjang jabatan fungsional diawali dengan Ajun Peneliti Muda mulai tahun 1993, Peneliti Muda mulai tahun 1995, Peneliti Madya mulai tahun 1997, dan Peneliti Ahli Utama bidang Fisika Radiasi mulai tahun 2018.

Menghasilkan 72 karya tulis ilmiah (KTI), baik yang ditulis sendiri maupun bersama penulis lain dalam bentuk buku, jurnal, dan prosiding. Sebanyak 41 KTI ditulis dalam bahasa Inggris dan 5 dalam bahasa Jepang.

Aktif dalam organisasi profesi ilmiah, yaitu anggota Asosiasi Proteksi Radiasi Indonesia (1981), anggota Himpunan Fisika Indonesia (1982), anggota The Atomic Energy Society of Japan (1988), anggota The Physical Society of Japan (1988), Ketua umum dan Sekjen Himpunan Masyarakat Nuklir Indonesia (1995), anggota Asosiasi Peneliti Kesehatan Indonesia (2012), anggota Himpunan Peneliti Indonesia (2019), dan anggota Himpunan Periset Indonesia (2022).

Menerima tanda penghargaan Zircon Medal “Experimental Originality Award” pada tahun 1992 dari The Atomic Energy Society of Japan serta Satyalancana Karya Satya X pada tahun 1993, Satyalancana Karya Satya XX pada tahun 2010, dan Satyalancana Karya Satya XXX pada tahun 2011 dari Presiden Republik Indonesia.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR ISI

BIODATA RINGKAS	v
PRAKATA PENGUKUHAN	xi
I. PENDAHULUAN	1
II. PERKEMBANGAN SISTEM DETEKSI RADIONUKLIDA	5
2.1 Sistem Deteksi Berbasis Detektor Isian Gas	6
2.2 Sistem Deteksi Berbasis Detektor Sintilasi	8
2.3 Sistem Deteksi Berbasis Detektor Semikonduktor	9
III. LITBANG SISTEM DETEKSI DAN PENGUKURAN RADIONUKLIDA	11
3.1 Sistem Deteksi untuk Laboratorium Metrologi Radiasi	11
3.2 Sistem Deteksi untuk Litbang Fisika Inti	15
3.3 Sistem Deteksi untuk Rejim Verifikasi CTBT	19
3.4 Deteksi Radio-xenon di Indonesia	23
IV. KESIMPULAN.....	27
V. PENUTUP.....	29
UCAPAN TERIMA KASIH	30
DAFTAR PUSTAKA.....	32
LAMPIRAN.....	40
DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH.....	42
DAFTAR PUBLIKASI LAINNYA.....	50
DAFTAR RIWAYAT HIDUP.....	52

Buku ini tidak diperjualbelikan.

PRAKATA PENGUKUHAN

Bismillahirrahmaanirrahiim,

Assalamu'alaikum warahmatullahi wabarakatuh,

Salam sejahtera untuk kita semua.

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

Pertama-tama, marilah kita panjatkan puji dan syukur ke hadirat Tuhan YME, Allah Swt., yang atas rahmat, nikmat, dan karunia, serta izin-Nya, kita dapat berkumpul dan hadir dalam acara Orasi Ilmiah Pengukuhan Profesor Riset di Organisasi Riset Tenaga Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional.

Pada kesempatan yang berbahagia ini, dengan segala kerendahan hati, izinkan saya dihadapan Majelis serta Bapak, Ibu, dan Saudara sekalian menyampaikan orasi ilmiah dengan judul:

SISTEM DETEKSI RADIONUKLIDA UNTUK
MENDUKUNG TRAKTAT PELARANGAN UJI COBA
NUKLIR

Buku ini tidak diperjualbelikan.

I. PENDAHULUAN

Uji coba nuklir dalam bentuk ledakan, yang lebih dikenal sebagai bom atom, telah dilakukan oleh sejumlah negara sejak tahun 1945. Selain menjadi ancaman perdamaian dunia, setiap uji coba nuklir menyisakan nuklida radioaktif atau radionuklida yang mencemari lingkungan. Jatuhan radioaktif (*fallout*) yang mencemari bumi bukan hanya dari ledakan bom atom Hiroshima dan Nagasaki, tetapi justru lebih banyak berasal dari serangkaian uji coba nuklir di sejumlah wilayah. Jumlah uji coba nuklir tersebut di seluruh dunia mencapai lebih dari 2.000 ledakan, sekitar 500 di antaranya adalah ledakan di atmosfer yang terjadi pada tahun 1950-an ketika belum ada larangan uji coba nuklir di atmosfer¹. Traktat *Partial Nuclear Test Ban Treaty* (PNBT) yang melarang uji coba nuklir di atmosfer, di luar angkasa, dan di dalam air telah disepakati pada tahun 1963 oleh Uni Soviet, Britania Raya, dan Amerika Serikat (AS). Namun traktat tersebut masih belum melarang uji coba nuklir di permukaan dan di bawah tanah (*underground*). Capaian diplomatik ini cukup menyejukkan, tetapi belum sepenuhnya menjamin tidak terulangnya kembali peristiwa di Hiroshima dan Nagasaki.

Melalui proses negosiasi diplomatik yang panjang, akhirnya pada tahun 1996, di New York, dideklarasikan suatu traktat yang melarang secara menyeluruh uji coba nuklir dengan kekuatan di atas 1 kiloton. Traktat ini dikenal dengan *Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty* (CTBT)². Indonesia merupakan salah satu negara penandatanganan traktat pada saat dideklarasikan. Pada “Annex 2” dalam traktat dinyatakan bahwa traktat akan berlaku secara efektif (*entry into force*) apabila diratifikasi oleh 44 negara nuklir, yaitu negara pemilik reaktor daya dan atau riset termasuk Indonesia. Walaupun secara global, traktat ini

telah ditandatangani oleh 186 negara dan diratifikasi oleh 176 negara termasuk Indonesia³, namun, traktat ini belum berlaku karena masih tersisa 8 dari 44 negara yang belum meratifikasi, yaitu India, Iran, Israel, Korea Utara, Mesir, Pakistan, Tiongkok, dan AS. Selain itu, 3 di antaranya belum menandatangani, yaitu India, Pakistan, dan Korea Utara. Di samping alasan strategis dan politik, secara teknis negara-negara yang belum meratifikasi tersebut perlu diyakinkan bahwa setelah traktat ini berlaku maka sudah tidak ada celah bagi negara-negara di dunia untuk melanggarnya tanpa diketahui dan kemudian mendapatkan sanksi.

Atas resolusi Majelis Umum Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB), traktat CTBT mengamanatkan dibentuknya suatu komisi persiapan berupa Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (Prepcom-CTBTO) guna mempersiapkan pelaksanaan traktat. Komisi ini mendapatkan mandat untuk membentuk suatu Provisional Technical Secretariat (PTS) CTBTO yang berkedudukan di Wina untuk membantu pengembangan rezim verifikasi yang terdiri atas sistem pemantau global (*global monitoring system*), pusat data internasional (*international data center*), dan inspeksi langsung atau *on-site inspection* (OSI). Sistem pemantau global berfungsi mengawasi kemungkinan adanya pelanggaran, baik di darat, laut, maupun udara melalui pemantauan indikator-indikator ledakan nuklir. Ledakan di permukaan dan di bawah tanah dipantau dengan alat pencatat getaran tanah (*seismic*), di udara dengan alat pencatat getaran udara (*infrasound*), dan di laut dengan alat pencatat getaran air (*hydro-acoustic*). Adapun indikator yang khas adalah dihasilkannya berbagai jenis radionuklida produk reaksi inti berantai bahan nuklir. Sistem deteksi radionuklida berperan penting untuk membedakan apakah suatu ledakan yang terdeteksi oleh alat pencatat getaran merupakan ledakan nuklir atau non-nuklir.

BATAN yang telah berintegrasi ke dalam Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), berdasarkan UU No. 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran, ialah lembaga penelitian dan pengembangan serta penyelenggara ketenaganukliran dengan tugas menguasai dan mengembangkan iptek nuklir untuk kemakmuran bangsa dan kesejahteraan masyarakat. Ada empat bidang kompetensi yang perlu dikuasai dan dikembangkan secara proporsional sesuai dengan manfaatnya bagi masyarakat, yaitu reaktor, akselerator, iradiator, dan detektor. Reaktor, akselerator, dan iradiator merupakan pembangkit langsung radiasi pengion berupa partikel berenergi tinggi, seperti proton, neutron, elektron, dan gelombang elektromagnetik, seperti sinar-X atau sinar- γ maupun tak langsung melalui pembentukan bahan radioaktif atau radionuklida. Detektor atau sensor radiasi pengion merupakan komponen utama suatu sistem deteksi radiasi untuk pengukuran kuantitas dan kualitas radiasi pengion. Sistem deteksi ini sangat penting untuk pemantauan dan pengendalian demi keselamatan dan keamanan masyarakat.

Penulis dan tim telah melakukan serangkaian penelitian dan pengembangan detektor yang diawali dengan pengembangan sistem deteksi radiasi untuk metrologi radiasi pada awal tahun 1980-an^{4,5,6,7} dan berlanjut di pertengahan tahun 1990-an^{8,9}. Selama menempuh studi di Jepang pada tahun 1987–1993, selain mulai mempelajari perkembangan mutakhir detektor isian gas¹⁰, penulis juga terlibat dalam pengembangan *focal plane detector* berbasis detektor isian gas^{11,12} yang digunakan untuk eksperimen fisika inti^{13,14,15}. Ketika bertugas di divisi OSI-CTBTO, penulis ikut terlibat bersama para ahli dalam pengembangan sistem deteksi radionuklida untuk keperluan inspeksi langsung di lapangan dan pemantauan global^{16,17,18}. Tujuan utama pengembangan ini ialah terwujudnya suatu sistem deteksi radionuklida yang spesifikasinya belum pernah

ada sebelumnya yaitu sistem deteksi dengan kepekaan sangat tinggi yang bekerja ibarat jutaan mata yang selalu memantau potensi pelanggaran traktat CTBT. Kegiatan ini masih berlanjut ketika penulis kembali bertugas di BATAN melalui kerja sama internasional dalam rangka meningkatkan kinerja sistem pemantau radio-xenon global^{19,20}, di samping tugas terkait dengan tupoksi di BATAN, yaitu litbang sistem pemantau radioaktivitas lingkungan²¹, sistem kontrol kualitas dosis radiasi²², pengembangan akselerator partikel^{23,24}, pendayagunaan Reaktor Kartini untuk riset *boron neutron capture therapy* (BNCT)^{25,26}, dan riset pemanfaatan thorium^{27,28}. Sampai saat ini, litbang terkait detektor masih berlanjut, antara lain untuk sistem pemantau radionuklida lingkungan²⁹, surveimeter digital³⁰, dan sistem pemantau bergerak berbasis pesawat nirawak³¹.

Dalam orasi ini, akan disampaikan perkembangan detektor radiasi pengion dan pengembangan sistem deteksi yang bermuara pada sistem deteksi radiasi untuk mendukung rezim verifikasi traktat CTBT. Detektor sebagai komponen utama sistem deteksi radiasi akan diulas perkembangannya di Bab II. Capaian litbang sistem deteksi radiasi dan radionuklida akan diuraikan di Bab III, antara lain hasil-hasil pengembangan sistem deteksi radionuklida untuk laboratorium metrologi radiasi, sistem deteksi radiasi untuk libang fisika inti, dan sistem deteksi radionuklida untuk mendukung traktat CTBT. Orasi akan diakhiri dengan Kesimpulan (Bab IV) dan Penutup (Bab V).

II. PERKEMBANGAN SISTEM DETEKSI RADIONUKLIDA

Radionuklida merupakan nuklida bersifat radioaktif yang secara spontan memancarkan radiasi berenergi kinetik tinggi yang lazim disebut radiasi pengion. Karena kemampuan indra manusia terbatas, keberadaan radiasi pengion tidak dapat dideteksi langsung dengan pancaindra. Untuk mengetahui keberadaan radiasi pengion diperlukan sensor radiasi yang mampu mengubah energi radiasi menjadi hal yang mudah terekam pancaindra. Keberadaan radiasi pengion mulai diketahui pada akhir tahun 1895 ketika Wilhem Conrad Roentgen menemukan radiasi sinar-X. Hanya berselang sekitar 2 bulan setelah itu, radiasi pengion juga diketahui keberadaannya ketika Henri Becquerel menemukan unsur uranium yang bersifat radioaktif. Kini, telah dikenal ribuan jenis bahan radioaktif, baik yang alamiah maupun buatan manusia.

Suatu sistem deteksi radionuklida pada umumnya terdiri atas komponen utama berupa sensor radiasi yang lazim disebut detektor dan peralatan pendukung elektronik pengubah respon detektor menjadi pulsa atau arus listrik. Selain itu, komponen utama sistem deteksi radionuklida dapat berupa alat baca dan perekam serta perangkat lunak pengolah data. Perkembangan sistem deteksi radionuklida tidak terlepas dari perkembangan bahan sensor dan komponen pendukungnya. Tonggak-tonggak penting perkembangan sistem deteksi radionuklida diawali dengan sensor plat film fotografi pada tahun 1896, sensor berbasis fenomena luminesens pada tahun 1901, sensor berbasis pengionan gas/udara pada tahun 1908, dan sensor berbasis bahan semikonduktor pada tahun 1960-an. Perkembangan komponen pendukungnya diawali dengan elektrometer untuk pengukuran

muatan listrik hasil pengionan pada tahun 1900-an, perangkat elektronik berbasis tabung triode sejak tahun 1920-an, tabung *photomultiplier tube* (PMT) pada tahun 1940-an, dan transistor semikonduktor pada tahun 1950-an, yang disusul dengan rangkaian elektronik terintegrasi atau *integrated circuit* (IC) dan *large scale integrated circuit* (LSIC) pada tahun 1960-an. Perkembangan ini melahirkan berbagai ragam modul elektronik pengolah pulsa seperti pre-amplifier, amplifier, diskriminator, SCA, TSCA, ADC, RDC, rangkaian koinsidensi, antikoinidensi, dan lain-lain, yang disusul dengan perkembangan sistem elektronik berbasis digital pada tahun 2000-an yang secara berangsur-angsur menggantikan sistem berbasis analog. Tidak kalah pentingnya adalah perkembangan mikroprosesor dan komputer dengan kecepatan dan kapasitas yang semakin besar. Perkembangan tersebut mendorong peningkatan kinerja sistem deteksi radiasi yang semula hanya mampu mencacah (*counting*), kemudian mampu membedakan jenis-jenis radiasi pengion dan mengidentifikasi berbagai macam radionuklida. Secara umum, perkembangan sensor radiasi berperan meningkatkan kepekaan deteksi, sedangkan perkembangan peralatan pendukung elektronik dan komputer meningkatkan tingkat keakuratan dalam pencacahan dan pengidentifikasian jenis radionuklida.

2.1 Sistem Deteksi Berbasis Detektor Isian Gas

Keberadaan sinar-X pertama kali diketahui dari berpendarnya barium-platinum-sianida yang berada di dekat tabung sinar katoda, sedangkan radiasi pengion yang dipancarkan unsur uranium diketahui dari plat film fotografi, yang secara kebetulan berada di dekat unsur tersebut, menjadi hitam. J.S. Townsend pada tahun 1901 menuliskan dalam artikelnya bahwa radiasi sinar-X dan radiasi yang berasal dari unsur uranium, thorium, polonium, dan radium bersifat mengionkan udara yang

dilintasinya, membentuk pasangan-pasangan ion positif dan negatif di sepanjang lintasannya³². Sejak saat itu, para ilmuwan mencoba melakukan pengukuran radiasi pengion dengan menggunakan elektrometer yang sudah lazim digunakan untuk pengukuran beda potensial dan muatan listrik. Penemuan radioaktivitas unsur thorium, polonium, dan radium oleh Marie Curie juga diperoleh berkat jasa elektrometer yang dibuat Pierre Curie dan Jacques Curie, dikenal sebagai elektrometer Curie³³.

Pada tahun 1908, Hans Geiger dan Ernest Rutherford membuat alat deteksi partikel- α berupa tabung gelas silinder memanjang yang berisi udara bertekanan rendah dan elektroda plat sejajar yang salah satunya dihubungkan dengan sumber tegangan tinggi dan elektrometer³⁴. Dengan alat ini, Rutherford berhasil menghitung kuantitas partikel- α yang terpancar dari satu gram radium sebanyak $3,410^{10}$ partikel per detik. Di kemudian hari, diketahui nilai yang lebih mendekati adalah $3,710^{10}$ partikel per detik. Nilai inilah yang kemudian didefinisikan sebagai satu Curie (Ci), yaitu suatu besaran aktivitas bahan radioaktif dengan jumlah peluruhan sebanyak $3,710^{10}$ disintegrasi per detik³⁵, sedangkan satu disintegrasi per detik kemudian juga didefinisikan dalam sistem satuan internasional (SI) sebagai satu becquerel (Bq)³⁶. Sejak saat itu, sebenarnya telah lahir sebuah detektor isian gas (*gas filled detector*), walau mekanisme yang terjadi di dalam detektor belum diketahui secara jelas. Pada tahun 1928, Hans Geiger mengemukakan fenomena lucutan Geiger (*Geiger discharge*) yang mendasari Hans Geiger bersama Walther Mueller dalam pembuatan detektor isian gas yang dikenal sebagai pencacah Geiger-Mueller (*GM counter*)³⁷. Pencacah GM mampu menghitung kuantitas radiasi yang datang ke detektor dengan mengonversi muatan listrik yang terkumpul pada elektroda detektor menjadi pulsa listrik. Dengan bantuan perangkat elektronik yang berfungsi sebagai

penguat (*amplifier*) dan pencacah (*counter*), keberadaan radiasi pengion menjadi lebih mudah diketahui oleh indra manusia dan diukur kuantitasnya. Dalam waktu singkat, pencacah GM menjadi primadona untuk penggunaan di bidang penelitian fisika partikel, fisika radiasi, dan sejumlah aplikasi yang terkait dengan radiasi pengion. Sejak itu, dipahami bahwa berdasarkan besar tegangan tinggi yang diberikan, ada tiga daerah kerja detektor isian gas, yaitu daerah kamar pengionan (*ionization chamber*), daerah pencacah proporsional (*proportional counter*), dan daerah lucutan Geiger. Hingga kini, detektor kamar pengionan masih berperan penting sebagai alat ukur dosis radiasi dan aktivitas radionuklida, sedangkan pencacah GM masih banyak digunakan dalam pemantauan dan survei radiasi untuk tujuan keselamatan dan proteksi radiasi. Adapun peran pencacah GM untuk penelitian fisika inti telah digeser oleh pencacah proporsional yang telah dikembangkan menjadi pencacah peka posisi (*position sensitive counter*) sejak tahun 1960-an.

2.2 Sistem Deteksi Berbasis Detektor Sintilasi

Selain pasangan ion, interaksi radiasi pengion dengan berbagai jenis bahan juga dapat menghasilkan foton sinar tampak melalui proses luminesens. Fenomena ini kemudian dimanfaatkan sebagai dasar pengembangan berbagai jenis detektor, salah satunya adalah detektor yang terbuat dari bahan sintilator. Sintilator merupakan bahan yang apabila terkena radiasi pengion dapat menghasilkan foton sinar tampak secara hampir spontan, yaitu dalam orde nanodetik yang dikenal dengan fenomena sintilasi. Fenomena ini sudah mulai dimanfaatkan sejak tahun 1900-an oleh Sir William Crookes. Saat itu, pengamatan pendaran foton sinar tampak jejak radiasi partikel- α unsur radium dilakukan dengan mata telanjang di ruang gelap dengan alat *spinthariscopes*³⁸. Dengan alat yang dapat dianggap sebagai

detektor radiasi pengion pertama ini, pengukuran kuantitas radiasi partikel- α masih kurang akurat. Detektor sintilasi baru berkembang dengan luas pada tahun 1944 setelah Sir Samuel Crowe Curran melengkapinya dengan tabung PMT³⁹. Alat bantu yang berfungsi mengubah cahaya atau sinar tampak menjadi pulsa listrik melalui proses pelipatgandaan foto-elektron ini telah mengakhiri era pencacahan radiasi- α dengan mata telanjang. Detektor sintilasi mempunyai sejumlah keunggulan dari detektor isian gas, antara lain respon yang jauh lebih cepat. Terbentuknya pulsa listrik dari pengumpulan muatan pada detektor isian gas mencapai orde waktu mikrodetik sampai milidetik, sedangkan pulsa listrik dari proses luminesens dan penggandaan elektron hanya memerlukan orde waktu nanodetik. Keunggulan lainnya adalah dengan bantuan beberapa rangkaian elektronik berbasis transistor semikonduktor, dapat ditampilkan informasi energi radiasi dalam bentuk spektrum. Sejak saat itu, pengetahuan tentang energi radiasi pengion berkembang dengan cepat dan berjenis-jenis unsur radioaktif semakin mudah diidentifikasi melalui pengukuran karakteristik dan analisis spektrum energinya (spektrometri).

2.3 Sistem Deteksi Berbasis Detektor Semikonduktor

Perkembangan detektor berlanjut pada tahun 1960-an, ketika sebuah sensor berhasil dibuat dari bahan semikonduktor germanium yang didopan dengan litium yang disebut detektor Ge(Li). Detektor Ge(Li) bekerja pada suhu sangat rendah yang harus dipertahankan terus-menerus dengan nitrogen cair. Dalam perkembangannya, bahan sensor dapat dibuat dari germanium kemurnian tinggi (*high-purity germanium*, HPGe) dan silikon yang didopan dengan litium, Si(Li). Baik detektor HPGe maupun Si(Li) tetap harus dioperasikan pada suhu nitrogen cair, tetapi tidak akan rusak apabila disimpan pada suhu kamar.

Prinsip kerja detektor semikonduktor mirip dengan detektor isian gas. Namun, ia mempunyai beberapa keunggulan, antara lain proses pengumpulan muatannya lebih cepat. Untuk energi radiasi dan volume aktif yang sama, jumlah pasangan ion-elektron yang terbentuk jauh lebih banyak karena pembentukannya hanya membutuhkan energi sekitar 3 eV dibandingkan 34 eV pada detektor isian gas⁴⁰. Keunggulan lain yang lebih penting adalah penggunaannya untuk spektrometri energi radiasi sinar-X/ γ . Detektor semikonduktor mempunyai resolusi (daya pisah) energi yang jauh lebih baik daripada detektor sintilasi maupun detektor isian gas. Sebagai contoh, energi sinar- γ sebesar 662 keV yang terpancar dari radionuklida ^{137}Cs apabila dideteksi dengan pencacah sintilasi akan menghasilkan spektrum dengan resolusi energi sekitar 60 keV *full width at half maximum* (FWHM) (9%), sedangkan bila diukur dengan detektor semikonduktor dapat dicapai resolusi kurang dari 2 keV FWHM (<0,3%). FWHM adalah lebar spektrum puncak energi pada setengah tinggi puncak yang menggambarkan resolusi energi suatu detektor. Dengan demikian, energi radiasi sinar- γ dari suatu bahan radioaktif yang berselisih sedikit > 2 keV dari 662 keV masih dapat dikenali oleh detektor semikonduktor. Dari keunggulan ini, walaupun harganya lebih mahal dari detektor berbasis sintilasi, detektor semikonduktor banyak digunakan untuk keperluan identifikasi dan pengukuran aktivitas radionuklida dengan ketelitian tinggi.

III. LITBANG SISTEM DETEKSI DAN PENGUKURAN RADIONUKLIDA

Pengembangan beberapa sistem deteksi radionuklida yang dilakukan meliputi kegiatan rancang bangun, penguasaan sejumlah metode beserta validasinya, dan peningkatan kinerja komponen-komponen sistem deteksi, yaitu detektor, sistem elektronik pengolah pulsa, serta sistem akuisisi dan analisis data. Ada empat jenis sistem deteksi radionuklida yang kami kembangkan, yaitu sistem deteksi untuk laboratorium metrologi radiasi, untuk penelitian fisika inti, untuk pelaksanaan traktat pelarangan uji coba nuklir, dan untuk keselamatan radiasi lingkungan. Karena masing-masing tujuan aplikasi memerlukan persyaratan dan spesifikasi sistem deteksi yang berbeda, diperlukan beragam inovasi dalam rancang bangun, penguasaan metode, dan usaha untuk peningkatan kinerja sistem. Secara singkat, dapat disampaikan bahwa untuk metrologi radiasi diperlukan sistem deteksi dengan tingkat ketelitian pengukuran (*accuracy*) tinggi, untuk penelitian fisika inti diperlukan sistem deteksi peka posisi dengan detektor berukuran besar dilengkapi daya pisah posisi (*position resolution*) tinggi, dan untuk mendukung rezim verifikasi *Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty* (CTBT) diperlukan sistem deteksi dengan kepekaan (*sensitivity*) tinggi.

3.1 Sistem Deteksi untuk Laboratorium Metrologi Radiasi

Suatu laboratorium metrologi radiasi dituntut mampu menyediakan berbagai jenis dan bentuk sumber radiasi standar melalui penentuan aktivitas sumber tersebut, baik dengan metode absolut (langsung) maupun metode relatif (tak langsung) dengan tingkat ketelitian tinggi atau nilai ketidakpastian pengukuran (*measurement uncertainty*) rendah. Dengan metode absolut,

aktivitas cuplikan bahan baku sumber radionuklida standar diukur tanpa harus mengkalibrasi sistem deteksi yang digunakan, sedangkan dengan metode relatif, sistem deteksi perlu dikalibrasi terlebih dahulu. Metode absolut menghasilkan sumber radiasi standar primer, sedangkan metode relatif menghasilkan sumber radiasi standar sekunder atau tersier. Kualitas sumber standar ditentukan oleh tingkat ketelitian, baik dalam penyiapan cuplikan maupun dalam pengukuran aktivitas. Pada umumnya, penentuan aktivitas secara absolut menghasilkan sumber standar dengan ketidakpastian pengukuran $\pm 1\% - 2\%$, sedangkan untuk pengukuran secara relatif sebesar $\pm 2\% - 5\%$.

Di BATAN, kami telah merancang beberapa variasi sistem deteksi untuk pengukuran aktivitas radionuklida pemancar β . Sistem deteksi bermetode absolut menggunakan detektor proporsional bergeometri 4π yang memungkinkan untuk mencacah partikel- β yang terpancar dari suatu sumber cuplikan berbentuk titik yang diletakkan di dalam detektor. Secara teoretis, detektor bergeometri 4π memberikan efisiensi deteksi mendekati 100% karena hampir seluruh partikel- β yang terpancar ke segala arah berada dalam ruang aktif detektor sehingga aktivitas suatu cuplikan dapat ditentukan dengan memperhitungkan beberapa faktor koreksi. Sejumlah faktor koreksi dapat dieliminasi dengan teknik koinsidensi, keluaran detektor partikel- β berbasis proporsional 4π dan detektor radiasi- γ/x berbasis sintilasi NaI(Tl) dikombinasikan menjadi suatu sistem koinsidensi $4\pi\beta\text{-}\gamma$. Uji coba sistem tersebut telah dimulai sejak tahun 1982 untuk penentuan aktivitas radionuklida pemancar partikel- β dan sinar- γ^A . Pada awal pengembangannya^{5,6}, sistem koinsidensi $4\pi\beta\text{-}\gamma$ telah digunakan untuk standardisasi radionuklida pemancar- $\beta\text{-}\gamma$ dengan bagan peluruhan sederhana seperti ^{60}Co , ^{134}Cs , dan ^{131}I . Pengembangan lebih lanjut telah dilakukan untuk standardisasi radionuklida pemancar- β murni seperti $^{90}\text{Sr}^{41}$, dan

radionuklida dengan bagan peluruhan kompleks seperti $^{153}\text{Sm}^{42}$. Di dalam pengembangan sistem deteksi ini telah kami temukan pula metode baru dalam penentuan tegangan kerja optimum detektor proporsional $4p\beta$ secara cepat⁷. Secara konvensional, tegangan kerja detektor proporsional ditentukan melalui kurva “plateau” yang diperoleh dari pengukuran laju cacah dengan variasi tegangan kerja. Dengan metode baru ini, tegangan kerja optimum dapat ditentukan dalam waktu yang lebih singkat. Sambil melihat tampilan pada osiloskop, pulsa asli dan pulsa derau keluaran detektor dipisahkan dengan sebuah rangkaian diskriminator. Metode ini telah digunakan di Laboratorium Metrologi Radiasi di Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR)-BATAN secara rutin.

Penguasaan metode pengukuran aktivitas dengan sistem koinsidensi $4p\beta\text{-}\gamma$ telah menghasilkan sejumlah sumber radiasi standar dengan ketidakpastian $\pm 1\text{--}2\%$. Namun, metode ini mengandung sejumlah keterbatasan karena setiap jenis radionuklida memiliki tingkat kesulitan pengukuran yang berbeda. Sebagai contoh, penentuan aktivitas ^{60}Co lebih mudah daripada ^{137}Cs karena bagan peluruhan ^{60}Co lebih sederhana daripada ^{137}Cs . Penggunaan sistem koinsidensi $4p\beta\text{-}\gamma$ terbatas hanya terhadap radionuklida pemancar- β dan tangkapan elektron (*electron capture*) yang dengan spontan diikuti pancaran sinar-X/ γ . Dengan demikian, ragam sumber standar yang diperoleh juga terbatas. Di sisi lain, suatu laboratorium metrologi radiasi dituntut untuk mampu melayani kebutuhan beragam sumber radionuklida standar secara berkesinambungan. Oleh karena itu, telah dikembangkan pula metode penentuan aktivitas secara relatif (tak langsung) dengan prosedur pengukuran dan penyiapan cuplikan untuk beragam radionuklida yang lebih sederhana dan cepat.

Metode penentuan aktivitas radionuklida secara relatif telah kami kembangkan melalui penguasaan metode kalibrasi sistem deteksi radionuklida pemancar- γ berbasis detektor semikonduktor dan kamar pengionan, masing-masing digunakan untuk penentuan aktivitas radionuklida pemancar- γ dengan aktivitas rendah dalam orde μCi (puluhan kBq) dan aktivitas tinggi dalam orde mCi (puluhan MBq). Pengembangan ini termasuk penguasaan metode penyiapan cuplikan sumber radionuklida standar padat dan cair, baik untuk kalibrasi detektor semikonduktor maupun kamar pengionan. Bahan baku sumber standar diperoleh secara internal dari hasil penentuan aktivitas secara absolut dengan sistem koinidensi $4p\beta\text{-}\gamma$ dan dari hasil kerja sama dengan beberapa laboratorium metrologi negara maju. Dari kegiatan ini, kami telah memperoleh sejumlah kurva kalibrasi dengan rentang energi sinar x/γ yang cukup lebar, antara lain kurva kalibrasi detektor semikonduktor Si(Li) untuk pemancar x/γ pada rentang energi 5–60 keV⁴³. Sebelumnya, telah diperoleh pula kurva kalibrasi detektor HPGe pada rentang energi- γ 40–2000 keV dan detektor kamar pengionan tipe sumur (*well type*) untuk sumber radionuklida cair dalam ampul pada rentang energi- γ 100–2000 keV. Dengan adanya kurva-kurva kalibrasi ini, berbagai jenis radionuklida pemancar- γ pada rentang energi tersebut dapat ditentukan aktivitasnya secara lebih cepat dan sederhana sehingga kemampuan BATAN juga meningkat dalam penyediaan sumber radionuklida standar untuk kalibrasi berbagai alat ukur radiasi, baik yang berbentuk titik padat maupun berbentuk silinder cair dalam ampul. Sumber standar cair dalam ampul, seperti ¹³¹I dan ^{99m}Tc dengan aktivitas dalam orde puluhan sampai ratusan MBq lazim digunakan untuk mengkalibrasi kalibrator dosis (*dose calibrator*) di rumah sakit kedokteran nuklir.

Keberhasilan penerapan metode pengukuran, baik secara absolut maupun relatif telah teruji dari sejumlah kegiatan

interkomparasi internasional yang diselenggarakan secara rutin oleh Bureau International des Poids et Mesures (BIPM) yang berkedudukan di Sèvres, Cedex, Prancis. BIPM telah mengembangkan sistem *Système International de Référence* (SIR) yang memungkinkan laboratorium dari seluruh dunia mengikuti interkomparasi tidak secara bersamaan. BATAN telah berpartisipasi dalam SIR sejak tahun 1980-an. Tercatat sejumlah larutan radionuklida standar, seperti ^{57}Co , ^{60}Co , ^{65}Zn , ^{131}I , ^{133}Ba , ^{134}Cs , ^{137}Cs , dan ^{241}Am , telah diikutsertakan dalam interkomparasi yang masing-masing hasilnya secara berkala dilaporkan dalam laman BIPM dan jurnal *Metrologia*⁴⁴. Selain melalui SIR, kegiatan interkomparasi juga dilakukan dengan beberapa negara lain sejak era Pusat Dosimetri dan Standardisasi (PDS)-BATAN⁴⁵, Pusat Standardisasi dan Penelitian Keselamatan Radiasi (PSPKR)-BATAN^{9,46,47}, dan PTKMR-BATAN⁴⁸ dengan hasil yang makin baik dari tahun ke tahun. Saat ini, PTKMR-BATAN telah berstatus sebagai institusi yang ditunjuk (*designated institute*) sebagai Laboratorium Metrologi Radiasi Penganugerahan di Indonesia⁴⁹ dan telah mampu menyediakan sumber radiasi standar untuk kalibrasi berbagai jenis alat ukur radiasi yang keterlelusuran (*traceability*) hasil pengukurannya terhubung ke sistem satuan internasional.

3.2 Sistem Deteksi untuk Litbang Fisika Inti

Eksperimen fisika inti menggunakan siklotron dan spektrograf magnetik. Eksperimen ini memerlukan suatu *focal plane detector system* yang terdiri atas satu atau lebih detektor peka posisi (*position sensitive*) untuk mengetahui posisi, distribusi, dan arah datangnya partikel; detektor sintilasi dengan sintilator plastik untuk penentuan energi berkas partikel; dan sistem elektronik pengolah pulsa keluaran detektor beserta perangkat lunaknya. Untuk keperluan ini, kami telah bergabung dengan para *civitas academica* di Kyushu University untuk meningkatkan kinerja

detektor peka posisi berbasis pencacah proporsional beranoda tunggal yang pengembangannya telah dirintis oleh Matoba dkk.⁵⁰. Dalam usaha ini, kami telah merancang detektor peka posisi baru yang akan dijadikan komponen utama *focal plane detector system* untuk eksperimen fisika inti dengan menggunakan spektrograf magnetik RAIDEN di Research Center for Nuclear Physics (RCNP)-Osaka University¹¹. Detektor tersebut berfungsi untuk mendeteksi spektrum energi eksitasi deuteron atau proton keluaran spektrograf yang berkisar antara 0–6 MeV. Spektrum tersebut merupakan hasil reaksi antara bahan target yang akan diteliti karakteristik inti atomnya dan berkas proton atau deuteron terpolarisasi yang dipercepat dengan suatu siklotron AVF hingga mencapai energi kinetik sebesar 65 MeV atau 56 MeV. Karena muatan listriknya, deuteron atau proton hasil reaksi yang masuk ke dalam spektrograf RAIDEN akan terputar seperempat lingkaran dengan jari-jari sebanding dengan energi kinetiknya. Dengan demikian, hasil pengukuran spektrum posisi partikel pada keluaran spektrograf dapat dikonversi menjadi spektrum energi eksitasi proton atau deuteron. Berdasarkan spektrum tersebut, dapat dianalisis karakteristik inti atom bahan target. Untuk kegiatan ini diperlukan detektor peka posisi dengan panjang minimal 1,5 m dan resolusi posisi maksimal 1,5 mm *full width at half maximum* (FWHM) sehingga akan diperoleh spektrum energi partikel dengan resolusi energi sekitar 40 keV FWHM. Dalam hal ini, kami telah merancang sebuah pencacah proporsional peka posisi beranoda tunggal dengan panjang 1,9 m, dinding katoda di sisi depan dan belakang terbuat dari mylar 0,6 mm selebar 30 mm sebagai *window* (jalan masuk partikel ke ruang aktif detektor), dan kawat anoda memanjang terbuat dari bahan berhambatan listrik (*resistive anoda wire*) Ni-Cr⁵¹. Posisi berkas partikel ditentukan dengan metode pembagian muatan (*charge division method*). Diawali dengan terbentuknya

elektron primer di ruang aktif detektor akibat partikel yang melintas, akibat pengaruh medan listrik, elektron primer akan bergerak ke arah kawat anoda terdekat, lalu terjadi penggandaan muatan listrik yang akan segera terkumpul pada anoda. Muatan listrik tersebut kemudian terbagi ke kedua ujung kawat anoda dan dengan rangkaian penguat awal (*pre-amplifier*), lalu diubah menjadi pulsa listrik dengan amplitudo sebanding dengan jumlah muatan pada masing-masing ujung anoda. Dari perbandingan amplitudo kedua ujung anoda yang dihitung secara otomatis dengan bantuan rangkaian *ratio to digital converter* (RDC), dapat ditampilkan spektrum posisi awal terkumpulnya muatan sehingga posisi datangnya partikel di sepanjang kawat anoda dapat diketahui. Dengan pencacah proporsional ini, resolusi posisi yang dicapai berkisar 1,5 mm.

Focal plane detector system tersebut telah digunakan untuk eksperimen reaksi *pickup* $^{92}\text{Mo}(p,d)^{91}\text{Mo}$ dan reaksi *stripping* $^{92}\text{Mo}(d,p)^{93}\text{Mo}$ serta telah diperoleh data level energi eksitasi inti atom bahan target ^{92}Mo untuk memahami karakteristik model kulit (*shell model*) inti atom¹³. Eksperimen juga dilakukan dengan bahan target bernomor atom dan nomor massa di sekitar *magic number*, yaitu ^{48}Ca dan ^{208}Pb untuk memahami struktur dan karakteristik permukaan inti atom tersebut^{14,15}. Selain untuk spektrograf RAIDEN di *Osaka University*, hasil pengembangan pencacah proporsional beranoda tunggal juga kami gunakan untuk pengukuran tampang lintang reaksi inti atom ^{12}C dengan akselerator TANDEM di *Kyushu University*⁵².

Hasil pengembangan detektor peka posisi yang kami lakukan bersama rekan dari *Matoba Laboratory* juga telah memberikan andil dalam memahami mekanisme pelipatgandaan muatan di dalam pencacah proporsional. Suatu fenomena baru terkait dengan daerah kerja detektor isian gas, selain yang telah dikenal saat itu, yaitu daerah kamar pengionan, proporsional, dan

Geiger-Mueller (GM) telah dipahami karakteristik spesifiknya, yaitu amplitudo pulsa keluaran detektor setinggi pulsa GM, tetapi dengan waktu bangkit secepat pulsa proporsional. Daerah kerja baru ini kemudian dikenal sebagai daerah *self quenching streamer* (SQS)¹⁰, yang terjadi ketika detektor dioperasikan di daerah transisi antara proporsional dan GM sampai di atas daerah GM. Daerah kerja SQS telah berhasil dioperasikan dengan beberapa gas ideal seperti argon, neon, atau kripton yang dicampur dengan gas hidrokarbon dan ditambahkan sedikit gas peredam (*quenching gas*)^{53,54,55}. Fenomena SQS juga terjadi ketika kami menggunakan campuran gas argon dan metan dengan komposisi 90%:10% dan 70%:30% yang dialirkan melewati cairan etanol sebagai peredam⁵⁶. Apabila diamati di ruang gelap atau dengan kamera fotografi, terlihat bahwa awan elektron yang terjadi di dalam detektor membentuk pita tipis (*streamer*) di lokasi tertentu saja, tidak menyebar ke seluruh ruang detektor sebagaimana yang terjadi pada pencacah GM⁵⁷. Keunggulan daerah kerja SQS adalah fungsinya sebagai detektor peka posisi dengan amplitudo pulsa keluaran yang jauh lebih tinggi dari pulsa proporsional. Hal ini telah memperbaiki kinerja detektor peka posisi karena membesarnya nisbah antara pulsa asli dan derau (*S/N ratio*). Resolusi posisi terbaik yang dapat dicapai adalah sekitar 1,1 mm⁵⁸.

Capaian lain dalam pengembangan detektor peka posisi ini adalah ketika pencacah proporsional anoda tunggal tersebut dicoba difungsikan menjadi pencacah peka posisi dua dimensi sederhana untuk pemantauan berkas partikel secara vertikal⁵⁹. Secara horizontal, posisi datangnya partikel ditentukan berbasis sistem pembagian muatan, sedangkan secara vertikal posisi tersebut ditentukan berbasis waktu tempuh elektron menuju kawat anoda. Cara ini menerapkan prinsip kerja detektor *drift chamber* yang dikembangkan Charpak dkk.⁶⁰, tetapi dengan

konstruksi yang jauh lebih sederhana. Posisi vertikal ditentukan dengan sistem *start* dan *stop* yang terdiri atas detektor sintilasi dengan sintilator plastik sebagai *start* dan pencacah proporsional itu sendiri sebagai *stop*, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1. Dari selisih waktu *start* dan *stop* yang diukur dengan rangkaian elektronik *time to amplitude converter* (TAC) dan *analog to digital converter* (ADC), dapat ditampilkan spektrum waktu tempuh elektron primer yang menggambarkan distribusi vertikal datangnya partikel. Dengan *drift chamber* sederhana ini, selain sebaran partikel secara horizontal, dapat dimonitor pula sebaran partikel secara vertikal. Resolusi posisi vertikal yang telah dicapai adalah 2,6 mm, cukup memadai untuk memonitor berkas partikel dengan lebar *window* vertikal detektor 30 mm.

Dalam rangka pengembangan detektor peka posisi dua dimensi secara khusus kami juga telah meneliti karakteristik *drift* elektron untuk beberapa komposisi dan jenis gas pengisi detektor. Dari penelitian ini ditemukan metode baru pengukuran kecepatan elektron untuk rentang kuat medan listrik yang dibangkitkan oleh tegangan tinggi detektor⁶¹. Kecepatan elektron dapat diukur lebih akurat ketika detektor dioperasikan di daerah SQS. Dengan eksperimen ini, selain penemuan metode baru, diperoleh mekanisme penggandaan muatan yang makin jelas yang terjadi pada daerah SQS itu. Berkat inovasi ini kami telah menerima penghargaan Experimental Originality Award dari Atomic Energy Society of Japan⁶².

3.3 Sistem Deteksi untuk Rezim Verifikasi CTBT

Traktat CTBT mengamanatkan Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization (PrepCom-CTBTO) agar mengembangkan sistem deteksi radionuklida untuk keperluan inspeksi langsung dan sebagai bagian dari sistem pemantauan global. Selama bergabung di

CTBTO, bersama para ahli dari sejumlah negara anggota, kami mendapat tugas mengembangkan sistem deteksi radionuklida untuk inspeksi langsung tersebut. Ada empat jenis sistem deteksi yang telah dikembangkan, yaitu sistem deteksi portabel (*hand held*) untuk kegiatan survei radiasi jarak pendek, sistem deteksi *mobile* untuk kegiatan survei radiasi dalam luasan 1.000 km², sistem pengidentifikasi radionuklida partikulat berbasis detektor semikonduktor HPGe, dan sistem pemantau radio-xenon (^{131m}Xe, ^{133m}Xe, ¹³³Xe dan ¹³⁵Xe).

Secara umum, spesifikasi sistem deteksi untuk *On-site Inspection* (OSI) hampir sama dengan yang digunakan dalam sistem pemantauan global, yaitu mampu mendeteksi dan mengidentifikasi radionuklida yang relevan dengan suatu ledakan nuklir yang dapat berupa produk hasil fisi, aktivasi neutron, dan sisa bahan bakar. Sejumlah radionuklida yang signifikan bagi CTBT yang telah ditetapkan PrepCom CTBTO adalah berupa partikulat ⁹⁵Nb, ⁹⁵Zr, ⁹⁷Zr, ⁹⁹Mo, ¹⁰³Ru, ¹⁰⁵Rh, ¹¹⁵Cd, ¹²⁶Sb, ¹²⁷Sb, ¹³¹I, ^{131m}Te, ¹³²Te, ¹³³I, ¹³⁶Cs, ¹⁴⁰Ba, ¹⁴⁰La, ¹⁴¹Ce, ¹⁴³Ce, ¹⁴⁴Ce, dan ¹⁴⁷Nd serta radio-xenon. Radio-xenon merupakan gas ideal yang lebih mudah terlepas ke atmosfer, sekalipun sumber ledakan berada di bawah tanah. Tingkat kepekaan sistem pengidentifikasi radionuklida partikulat untuk OSI setara dengan sistem untuk pemantauan global yang ditempatkan di laboratorium, yaitu kemampuan mendeteksi lepasan radionuklida ¹⁴⁰Ba dengan *minimum detectable concentration* (MDC) 10–30 μBq/m³ cuplikan udara⁶³. Untuk alat deteksi radio-xenon, spesifikasi yang harus dipenuhi adalah kemampuan mendeteksi ¹³³Xe dengan MDC 1 mBq/m³ cuplikan udara⁶⁴. Sebagai pembanding, MDC alat pemantau radioaktivitas lingkungan di PTKMR-BATAN memiliki orde 1000 kali lebih besar, yaitu sekitar 1 Bq/kg cuplikan padat atau cair. Selain itu, karena peralatan akan dibawa masuk ke suatu wilayah negara terduga pelanggar

traktat, ada dua spesifikasi tambahan, yaitu mudah diangkut dan dioperasikan di medan dengan berbagai kondisi lingkungan yang ekstrem, dan adanya pembatasan kemampuan identifikasi hanya terhadap radionuklida yang relevan dengan CTBT (*measurement restriction*). Kemampuan identifikasi terhadap radionuklida yang tidak relevan dengan CTBT harus dibutakan (*blinding*). Dengan sejumlah persyaratan tersebut, seluruh sistem deteksi untuk OSI harus dikembangkan secara khusus (*tailored*) karena tidak ditemukan di pasaran (*of-the-shelf*). Rancang bangun sistem deteksi untuk OSI dibuat berdasarkan masukan para ahli dari negara-negara anggota dan kemudian kami tuangkan dalam dokumen teknis CTBTO yang bersifat informatif^{16,17,18}. Berbasis dokumen ini, dapat kami susun spesifikasi teknis untuk proses pengadaan, konstruksi, dan pengujian di laboratorium dan di lapangan. Sistem ini telah digunakan untuk keperluan *testing* dan *training*.

Sistem deteksi portabel (*hand held*) untuk kegiatan survei radiasi jarak pendek kami peroleh melalui modifikasi sistem yang telah ada di pasaran yang berbasis sistem deteksi radiasi sinar- γ dengan detektor sintilasi NaI(Tl)¹⁶. Persyaratan *measurement restriction* dan *blinding*, kami realisasikan melalui pembatasan jumlah data nuklir yang disimpan di dalam *library* perangkat lunaknya sehingga tampilan hasil pengukuran dan analisis hanya terbatas pada radionuklida yang relevan dengan CTBT saja. Untuk meningkatkan kepekaan deteksi, sistem ini dilengkapi dengan koreksi cacah latar belakang yang berasal dari radionuklida ^{40}K , ^{238}U , dan ^{232}Th . Rancang bangun sistem deteksi *mobile* untuk kegiatan survei radiasi dengan medan yang luas, pada prinsipnya sama dengan sistem portabel, tetapi digunakan detektor sintilasi dengan volume kristal yang jauh lebih besar. Sistem deteksi portabel dan *mobile* telah digunakan untuk pengujian konsep-konsep operasi OSI dan *training* para calon inspektur.

Sistem deteksi radionuklida partikulat, kami rancang dengan menggunakan detektor semikonduktor HPGe, sebagaimana yang lazim digunakan untuk spektrometri-g¹⁷. Untuk mengatasi kendala ketiadaan nitrogen cair di negara tujuan inspeksi, dipilih jenis detektor berpendingin *hybrid*, yaitu nitrogen cair yang didinginkan secara elektrik (*electrical cooling system*), sedangkan untuk mengatasi ketiadaan listrik di lapangan digunakan catu daya baterai. Untuk merealisasikan konsep *measurement restriction* dan *blinding*, secara khusus telah kami rancang perangkat lunak dengan kemampuan analisis data pengukuran secara otomatis tanpa menampilkan spektrum energi sinar- γ hasil pengukuran.

Rancang bangun sistem deteksi radio-xenon untuk OSI terdiri atas tiga modul utama, yaitu sistem pencuplik (*sampling*), sistem pemroses cuplikan gas (*processing*), dan sistem pencacah radio-xenon¹⁸. Teknik koinsidensi $4p\beta/e-\gamma$ digunakan pada sistem pencacah yang terdiri atas detektor sintilasi $4p\beta/e$ dengan sintilator plastik dan detektor- γ dengan sintilator NaI(Tl). Detektor $4p\beta/e$ sekaligus berfungsi sebagai wadah cuplikan gas radio-xenon setelah melalui proses *sampling* dan *processing*. Prinsip kerja sistem pencacah radio-xenon menggunakan teknik koinsidensi $4p\beta/e-\gamma$ sebagaimana sistem deteksi untuk pengukuran aktivitas secara absolut pada Lab Metrologi Radiasi. Kelebihan sistem koinsidensi $4p\beta/e-\gamma$ untuk radio-xenon adalah dilengkapinya dengan perangkat pendukung yang memungkinkan penentuan aktivitas keempat nuklida radio-xenon dalam sekali *counting*. Sistem deteksi radio-xenon tidak perlu menerapkan konsep *measurement restriction* dan *blinding* karena cuplikan yang diukur telah dimurnikan dan tidak tercampur dengan radionuklida yang tidak relevan dengan CTBT.

3.4 Deteksi Radio-Xenon di Indonesia

Fasilitas produksi ^{99m}Mo sebagai generator isotop medik ^{99m}Tc berbahan baku uranium, seperti milik PT BaTek (sekarang PT INUKI), menghasilkan produk fisi radio-xenon dengan karakteristik yang hampir sama dengan radio-xenon dari suatu ledakan nuklir. Karena waktu paruh radio-xenon yang paling dominan, yaitu ^{133}Xe hanya 5,2 hari dan disertai faktor pengenceran udara yang besar, walaupun terlepasnya radio-xenon ke lingkungan dapat diabaikan dari aspek keselamatan radiasi. Namun, masih cukup signifikan pengaruhnya dari aspek kinerja sistem pemantau radio-xenon CTBTO yang berada di stasiun terdekat. Hal ini mendorong dilakukannya penelitian untuk mengetahui karakteristik lepasan radio-xenon dari sejumlah fasilitas produksi isotop medik di seluruh dunia. Untuk penelitian di Indonesia, kami berhasil menggalang kerja sama internasional dan mendapatkan pendanaan dari Uni Eropa dan US DOE. Kerja sama penelitian antara BATAN, CTBTO, PT BaTek dan PNNL-USA dilakukan untuk pengukuran radio-xenon di dua tempat, yaitu di cerobong gas PT BaTek di Kawasan Nuklir Serpong dan di Kawasan Nuklir Pasar Jumat yang berjarak 14 km dari cerobong. Untuk pengukuran di PT BaTek digunakan sistem deteksi berbasis spektrometri- γ dengan detektor sintilasi $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ yang dilengkapi dengan sistem pencuplik gas, perisai radiasi, sistem pengolah pulsa, sistem penyimpanan data berbasis *multi channel analyser* (MCA), dan laptop. Kristal $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ dipilih karena merupakan bahan sintilator yang menghasilkan daya pisah energi terbaik di antara detektor sintilasi di pasaran. Sistem deteksi radio-xenon yang dioperasikan sejak 1 Februari 2013 sampai dengan 22 Desember 2013 berhasil memantau 80% dari waktu produksi PT BaTek. Dalam waktu tersebut, telah terhimpun sekitar 25 ribu data spektrum radiasi- γ dengan interval 10 menit. Dari pengukuran ini diketahui bahwa aktivitas

rata-rata harian radio-xenon di cerobong PT BaTek pada bulan Februari, Maret, dan April 2013 adalah sebesar $2,810^{12}$ Bq ^{133}Xe dan $6,510^{12}$ $^{135}\text{Xe}^{19}$. Lepasannya radio-xenon yang bersumber dari 590 Ci ^{99}Mo dalam 6 hari produksi pada kurun waktu tersebut sangat rendah dari aspek keselamatan radiasi, namun dapat dengan mudah terdeteksi oleh sistem deteksi radio-xenon *Swedish Automatic Unit for Noble Gas Acquisition II* (SAUNA II) yang berjarak 14 km dari cerobong lepasannya di Serpong.

Pengukuran radiasi di Kawasan Nuklir Pasar Jumat menggunakan sistem deteksi SAUNA II, yang spesifikasinya sama dengan yang dikembangkan untuk OSI maupun yang dioperasikan di 40 lokasi stasiun pemantau CTBTO. SAUNA II beroperasi secara otomatis dan kontinu dengan siklus 8 jam *sampling*, 8 jam *processing*, dan 8 jam *counting* menghasilkan tiga data konsentrasi aktivitas radio-xenon setiap hari. Data ini, bila dikombinasikan dengan data hasil pemodelan atmosferik, akan menghasilkan estimasi lepasannya radio-xenon. Estimasi dari hasil pengukuran di Pasar Jumat cukup konsisten dengan hasil pengukuran di Serpong, dengan perbedaan kurang dari 10%. Sebagai contoh, pengukuran pada periode 15–21 Oktober 2013 menunjukkan estimasi lepasannya ^{133}Xe di Serpong sebesar $1,810^{13}$ Bq dan di Pasar Jumat sebesar $1,8810^{12}$ Bq. Dari kedua pengukuran ini, dapat diestimasi bahwa lepasannya ^{133}Xe sepanjang tahun produksi adalah 810^{14} Bq²⁰. Agar tidak mengganggu sistem pemantau global CTBTO, lepasannya ini perlu dibatasi tidak melebihi 510^9 Bq per tahun. Tindak lanjut dari hasil penelitian ini adalah ditandatanganinya *memorandum of understanding* (MOU) tentang pembatasan lepasannya radio-xenon ke atmosfer pada akhir tahun 2013 antara PT BaTek dan CTBTO⁶⁵. Pengukuran dengan SAUNA II telah dilanjutkan di stasiun Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika (BMKG) Manado, tetapi tidak diperoleh data lepasannya radio-xenon dari PT BaTek.

Hingga kini, keberadaan sistem deteksi yang dikembangkan CTBTO telah menunjukkan manfaat global yang signifikan. Sebagai contoh, sistem deteksi radio-xenon CTBT di Vancouver, Kanada telah berhasil mendeteksi uji coba nuklir Korea Utara pada tahun 2006 dan sesudahnya, sedangkan keberadaan 80 stasiun pemantau radionuklida partikulat CTBTO secara tidak langsung telah memberikan data global tingkat radiasi latar secara teratur. Stasiun pemantau radionuklida CTBTO yang sangat peka juga dapat menyediakan data sebaran radionuklida dengan lebih cepat manakala terjadi kecelakaan nuklir, seperti yang terjadi di PLTN Fukushima Daiichi. Selain itu, arsip cuplikan yang terkumpul di CTBTO setiap hari juga bermanfaat untuk studi perubahan iklim melalui identifikasi pergerakan massa udara dan sebaran polutan udara global.

Di BRIN, saat ini ada dua kegiatan yang sedang dilakukan, yaitu pengembangan sistem pemantau radioaktivitas menetap (*stationary*) dengan target MDC setara dengan sistem deteksi CTBTO⁶⁶ dan sistem pemantau bergerak berbasis pesawat tanpa awak (*drone*)³¹. Kedua sistem ini diharapkan dapat dimanfaatkan, baik untuk keperluan sendiri maupun CTBTO. Sistem pemantau menetap yang sedang dikembangkan terdiri atas alat *sampling* udara berkapasitas besar (>500 m³/jam) yang akan ditempatkan di lokasi yang tepat, sistem deteksi berbasis spektrometri- γ dengan detektor HPGe efisiensi tinggi (60%) di laboratorium, penahan radiasi kualitas tinggi, sistem veto penekan Compton (*Compton suppression*) berbasis antikoinidensi, dan sistem pemompa gas radon ruangan. Indonesia perlu memiliki sistem pemantau yang berkemampuan setara dengan sistem pemantau CTBT karena di antara 80 lokasi stasiun CTBT, tidak ada satu pun yang berada di Indonesia (Gambar 2). Sesuai traktat, stasiun pemantau terdekat berada di Malaysia, Thailand, Filipina, Papua Nugini, Guam-Amerika Serikat, serta Kepulauan Cocos dan Darwin

Australia. Selain itu, lokasi sistem pemantau CTBT kurang mengantisipasi ketidakteraturan arah angin di khatulistiwa⁶⁷. Survei pendahuluan untuk penempatan peralatan *sampling* telah dilakukan di beberapa kandidat lokasi. Dengan memperhatikan sejumlah kriteria dan data hasil pemodelan atmosferik CTBTO, Stasiun BMKG Bandar Udara Supadio Pontianak merupakan salah satu lokasi paling potensial⁶⁸.

Pengembangan sistem pemantau berbasis *drone* dimaksudkan untuk meningkatkan kinerja sistem pemantau bergerak (*mobile*) dengan kendaraan darat untuk operasi kedaruratan nuklir yang telah dirancang oleh para peneliti BATAN⁶⁹. Sistem ini merupakan optimasi dari sistem dengan kendaraan darat yang mempunyai keterbatasan daya jelajah dan sistem dengan pesawat terbang atau helikopter yang mempunyai keterbatasan bermanuver terbang rendah di lokasi yang rumit, seperti gedung-gedung perkotaan, pepohonan, dan hutan. Penggunaan *drone* diharapkan akan memberikan sejumlah keunggulan, seperti kecepatan terbang yang mudah dikendalikan dan keluwesan bermanuver. Uji coba prototipe hasil rancang bangun yang terdiri atas detektor GM, sistem pengolah pulsa, dan pengendali berbasis mikrokontroler yang ringan dan murah, serta perangkat lunak untuk sistem transfer, akuisisi, dan analisis data telah berhasil menguji kinerja sistem perangkat lunaknya³¹. Tindak lanjut inovasi teknologi untuk sistem ini dirancang dengan menggunakan detektor sintilasi CdZnTe yang berkemampuan mengidentifikasi radionuklida dan penggunaan *drone* dengan daya angkut yang lebih besar. Salah satu manfaat yang diharapkan adalah kegunaannya untuk pemetaan dan pemantauan radionuklida lingkungan seperti NORM dan TENORM di area pertambangan dengan biaya operasi yang lebih murah.

IV. KESIMPULAN

Sistem deteksi radiasi dan radionuklida terus berkembang dari waktu ke waktu seiring dengan perkembangan tingkat pengetahuan tentang radionuklida, radiasi pengion, dan berbagai aplikasinya. Sejumlah capaian yang diperoleh sepanjang karier kami sebagai peneliti bidang fisika radiasi telah memberikan andil dalam perkembangan sistem deteksi radionuklida untuk berbagai aplikasi tersebut. Perkembangan sistem deteksi radionuklida didorong dan dipercepat oleh berbagai aplikasi yang spesifik. Dalam pengembangan suatu sistem deteksi radionuklida, selain penguasaan iptek bahan sensor radiasi, juga diperlukan kemampuan merancang atau mengombinasikan dengan berbagai penemuan baru di bidang teknologi instrumentasi, elektronika, dan teknologi informasi untuk menyederhanakan sistem pengolah pulsa, sistem penyimpanan, pengolahan, dan transfer data hasil pengukuran.

Keberhasilan kami dalam penerapan metode pengukuran aktivitas radionuklida, baik secara absolut maupun relatif dengan ketidakpastian hasil pengukuran $\pm 1\% - 5\%$ telah meyakinkan penggunaan sistem deteksi berbasis sistem koinsidensi $4p\beta\text{-}\gamma$, kamar pengionan, dan spektrometri- γ sebagai peralatan utama suatu Laboratorium Metrologi Radiasi Nasional di BRIN. Keterlibatan kami di Kyushu University dalam pengembangan *focal plane detector system* untuk eksperimen fisika inti telah menghasilkan sistem deteksi peka posisi dengan resolusi posisi sekitar 1–1,5 mm FWHM. Pada kesempatan itu, kami juga berhasil menemukan metode baru untuk pengukuran kecepatan elektron dalam medan listrik pada media gas, sekaligus memperoleh inovasi baru dalam penggunaan detektor proporsional dengan konstruksi sederhana untuk deteksi posisi

dua dimensi, horizontal-vertikal. Bertumpu pada sejumlah pengetahuan dan pengalaman tersebut, kami bergabung bersama para ahli seluruh dunia di CTBTO dalam pengembangan beberapa jenis sistem deteksi radionuklida untuk inspeksi langsung dan pemantauan global. Salah satu capaian yang penting berupa sistem deteksi radio-xenon untuk dioperasikan di medan yang ekstrem dengan sensitivitas dalam orde mBq/m^3 cuplikan udara. Keikutsertaan dalam pengembangan sistem deteksi radionuklida untuk mendukung pelaksanaan traktat CTBT ini merupakan pengalaman terbaik sepanjang karier kami sebagai peneliti dan menjadi bekal penting dalam pengembangan sistem deteksi serupa untuk pemantauan radioaktivitas lingkungan di Indonesia, baik untuk kondisi rutin maupun darurat nuklir.

Sejumlah hasil litbang yang kami lakukan bersama kolega di Indonesia dan komunitas internasional telah memberikan andil dalam menyelesaikan berbagai hal. Keberadaan Laboratorium Metrologi Radiasi Nasional sangat diperlukan dalam penerapan sistem mutu laboratorium pengukuran radiasi berbasis ISO 17025, memperbaiki tingkat ketelitian hasil pengukuran, dan menjamin ketertelusuran hasil pengukuran ke sistem satuan internasional. Hasil penelitian eksperimental fisika inti di Kyushu University dengan menggunakan *focal plane detector system* telah banyak disitasi oleh para fisikawan teoretis dan eksperimental. Hasil pengukuran radio-xenon jarak dekat di Serpong yang dikombinasikan dengan pemodelan atmosferik telah membantu dalam memvalidasi hasil pengukuran jarak jauh di Jakarta. Indonesia diharapkan dapat segera menyempurnakan suatu sistem deteksi radionuklida hasil pengembangan sendiri yang berkemampuan tinggi untuk tujuan keselamatan radiasi dan pengamanan seluruh wilayah tanah air secara efektif dan efisien.

V. PENUTUP

Perkembangan berbagai jenis sensor radiasi dan perangkat pendukungnya makin memberikan keleluasaan untuk dirangkai menjadi sistem deteksi dengan kinerja yang makin akurat dan peka untuk berbagai tujuan pemanfaatan. Namun, agar pemanfaatan tersebut efektif dan efisien, tetap diperlukan sumber daya manusia (SDM) dengan pengetahuan yang luas dan keterampilan yang tinggi.

Status pengembangan sistem deteksi radionuklida telah mencapai tingkat ketelitian dan kepekaan yang mampu mendeteksi sumber radiasi, bukan hanya pada tingkat keselamatan radiasi (dalam orde Bq/m³) melainkan juga pada tingkat keamanan nuklir dan forensik (dalam orde mBq/m³). Hal ini makin memberikan rasa aman bagi masyarakat dunia. Dari aspek politik dan keamanan global, tidak ada alasan bagi negara-negara penandatangan traktat CTBT untuk tidak segera meratifikasi agar traktat tersebut berlaku secara efektif. Indonesia perlu segera meningkatkan penguasaan teknologi, rekayasa, dan pengoperasian sistem pemantau radionuklida yang akan menempatkan Indonesia, bukan hanya sebagai negara yang diawasi, tetapi juga berperan ikut mengawasi dunia.

Penguasaan iptek sistem deteksi radionuklida akan bermuara pada tingkat kepercayaan dan akseptabilitas masyarakat yang makin tinggi terhadap pemanfaatan iptek nuklir di bidang kesehatan, industri, keselamatan radiasi lingkungan, dan pembangkitan energi, khususnya pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN). Terkait hal ini, peran lembaga riset BRIN dalam memberikan iklim yang baik untuk berkembangnya kemampuan SDM pelaku litbangjirap iptek nuklir di Indonesia menjadi sangat strategis.

UCAPAN TERIMA KASIH

Perkenankan kami mengakhiri orasi ini dengan mengucapkan puji dan syukur atas segala limpahan nikmat Allah Swt. dan terima kasih atas kesempatan untuk menyampaikan orasi kepada Kepala BRIN, Dr. Laksana Tri Handoko, M.Sc.; Ketua Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Prof. Dr. Bambang Subiyanto, M.Agr.; Sekretaris Majelis Pengukuhan Profesor Riset, Prof. Dr. Ir. Gadis Sri Haryani; Tim Penelaah Naskah Orasi, yaitu Prof. Dr. Ir. Anhar Riza Antariksawan (BRIN), Prof. Dr. Mukh Syaifudin (BRIN), Prof. Dr. Zaki Su'ud, M.Eng. (ITB).

Terima kasih kepada Kepala OR Tenaga Nuklir BRIN, Dr. Rohadi Awaludin; Kepala Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir OR Tenaga Nuklir BRIN, Dr. Heru Prasetyo; Kepala BOSDM BRIN, Ratih Retno Wulandari S.Sos, M.Si.; dan Panitia Pelaksana Pengukuhan Profesor Riset.

Terima kasih kepada Kepala BATAN periode 2019–2021, Prof. Dr. Ir. Anhar Riza Antariksawan; para kepala BATAN periode sebelumnya; dan Tim Penelaah Naskah Orasi ORTN-BRIN, yaitu Prof. Dr. Ridwan, Prof. Dr. Mukh Syaifudin, Prof. Dr. Ir. Anhar Riza Antariksawan, Prof. Dr. Ir. Efrizon Umar, M.T., Prof. Dr. Muhayatun, M.T., Prof. Dr. Ir. Pande Made Udiyani (almh.), Prof. Drs. Surian Pinem, M.Si., dan Prof. Dr. Dani Gustaman Syarif, M. Eng.

Terima kasih kepada Prof. Dr. Ing. B.J. Habibie (alm.) dan Prof. Dr. Ing. Wardiman Djojonegoro atas kesempatan untuk melanjutkan studi di luar negeri melalui *Overseas Fellowship Program* (OFP) dan kepada Prof. Dr. Masaru Matoba atas bimbingan beliau selama menyelesaikan program S-2 dan S-3 di Kyushu University.

Ucapan terima kasih kepada teman-teman yang telah memberikan dukungan dan bekerja sama selama ini, kepada para anggota KPTF, teman-teman di Ruang Engineering, di Bidang Fisika Partikel, Teknologi Proses, K3, dan Reaktor PSTA-BATAN, serta para anggota KPTF, teman-teman di Bidang Metrologi Radiasi, Dosimetri, Keselamatan Radiasi, dan Biomedika Nuklir PTKMR-BATAN,

Ucapan terima kasih kepada Bapak/Ibu Guru di SDN Sentolo I, SMPN Sentolo I, SMAN I Yogyakarta, dan Bapak/Ibu Dosen di Fisika-FIPIA UI Jakarta atas peletakan bekal landasan ilmu pengetahuan yang kokoh.

Pada kesempatan ini, kami juga ingin bersujud dan bersyukur atas apa yang kedua orang tua telah lakukan, yaitu Ibuku tersayang Suwarsi dan Bapak Payar Noto Widodo (alm.) yang telah membesarkan, me-*nggulawentah*, serta mengarahkan jalan hidup dan masa depan diri kami. Demikian pula kepada almarhum bapak dan almarhumah ibu mertua serta semua adik-adik yang telah memberikan dorongan semangat dan doa. Untuk istri tercinta, Sri Rahayu, dan anak-anakku tersayang, Wahyu Ramadhanni Umareta, Wahyu Anggoro Chihayanto, dan Nastia Siti Deviena Widodo, terima kasih tak terhingga atas cinta dan kasih sayang kalian yang telah menjadi sumber penyemangat dan inspirasi.

Akhirnya, terima kasih kepada Bapak/Ibu/Saudara/Saudari yang telah berkenan hadir, baik secara luring maupun daring. kami mohon maaf atas segala khilaf dan kekurangan dalam orasi pengukuhan ini. Semoga Allah Swt. senantiasa memberikan kepada kita petunjuk, rahmat, dan hidayah-Nya. *Aamiin*

Billahittaufik wal hidayah, wassalamualaikum warahmatullahi wabarakatuh.

DAFTAR PUSTAKA

1. CTBTO. Nuclear testing: world overview [internet]; 1 Mei 2021. <https://www.ctbto.org/nuclear-testing/history-of-nuclear-testing/world-overview/>
2. CTBTO. Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT) [internet]; 1 Mei 2021. <https://www.ctbto.org/the-treaty/treaty-text/>
3. CTBTO. Status signature and ratification [internet]; 1 Mei 2021. <https://www.ctbto.org/the-treaty/status-of-signature-and-ratification/?states=1&cHash=3ed261ca951713ee9ebb47d0cb98f266>
4. **Widodo S.** Pengukuran aktivitas secara absolut dengan metode koinidensi $4\pi\beta\text{-}\gamma$ [tesis sarjana]. [Depok]: Jurusan Fisika FIPIA Universitas Indonesia; 1982.
5. **Widodo S.** Pengukuran aktivitas secara absolut sumber-sumber standar buatan PDS. *Majalah BATAN*. 1984;XVII(1):37–48.
6. **Widodo S.** Sunaryo, Juita E, Mulyono E. Standardisasi I-131 di PSPKR BATAN. *Majalah BATAN*. 1986;XIX(4):29–39.
7. **Widodo S.** Sunaryo S, Penentuan secara cepat tegangan kerja optimum pencacah $4\pi\beta$ dengan metode Houtermans. *Majalah BATAN*. 1982; 15.4:10–17.
8. **Widodo S.** Spektroskopi alpha dengan pencacah sawar muka. *Majalah BATAN*. 1985; XVIII(4):71– 84.
9. Pudjadi M, **Widodo S**, Sunaryo S, Sudarsono S, Juita E, Nazaroh K. Antarbanding pengukuran aktivitas Co-57 antara PSPKR dengan beberapa rumahsakit: Unjuk kerja dan kalibrasi kalibrator dosis. *Prosiding Seminar Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Kesehatan*; Jakarta, 23-24 Agustus 1994:54–57.
10. **Widodo S.** Self quenching streamer (SQS) mode: Perkembangan baru detector gas. *Majalah BATAN*. 1988;XXI(3-4):43-55.

11. **Widodo S.** 大型スペクトログラフ用焦点面 検出 器の開発研究 Research and development of focal-plane detector system for a large magnetic spectrograph [tesis]. [Kyushu]: Department of Energy Conversion Engineering, Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University; 1990.
12. **Widodo S.** Pencacah proporsional peka posisi anoda tunggal tipe kamar apung. Proceeding Pertemuan Ilmiah Tenaga Atom Karyawan Indonesia di Jepang I; Kyushu University, Fukuoka, Jepang, 19 Oktober 1991:145-158.
13. Hisamochi K, Iwamoto O, Kisanuki A, Budihardjo S, **Widodo S**, Nohtomi A, dkk. Hole strengths and spreading widths observed in $^{92}\text{Mo}(\text{pol.p,d})^{91}\text{Mo}$ reaction at 65 MeV. Nuclear Physics A. 1993; 564(2):227-251.
14. Uozumi Y, Iwamoto O, **Widodo S**, Nohtomi A, Sakae T, Matoba M, Nakano M., Maki T, and Koori N. Single-particle strengths measured with $^{48}\text{Ca}(\text{pol.d,p})^{49}\text{Ca}$ reaction at 56 MeV. Nuclear Physics A. 1994; 576(1):123-137.
15. Matoba M, Yamaguchi K, Kurohmaru K, Iwamoto O, **Widodo S**, Nohtomi A, Uozumi Y, Sakae T, Koori N, Maki T, Nakano M. Depletion of the $2f_{7/2}$ neutron hole state in ^{207}Pb . Phys. Rev. C 55. 1997; 3152-3154.
16. CTBTO. OSI Equipment: Procurement specifications for radionuclide survey and analysis equipment for testing and training purpose, CTBT/PTS/INF.163; 4 Juni 1999.
17. CTBTO. Procurement of high resolution gamma spectrometer tool for field on laboratory use: current status, CTBT/PTS/INF.298; 16 Juni 2000.
18. CTBTO. Detailed technical specifications and requirements for the developing of on-site inspection equipment for xenon sampling, separation and measurement, CTBT/PTS/INF.578; 24 Maret 2003.
19. McIntyre JI, Agusbudiman A, Cameron IM, Dumais JR, Eslinger PW, Gheddou A, Khurstalev K, Marsoem P, Miley HS, Nikkinen M, Prinke AM. Real-time stack monitoring at the BaTek medical

- isotope production facility. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*. April 2016;308(1):311-6.
20. Eslinger PW, Cameron IM, Dumais JR, Imardjoko Y, Pujadi M, McIntyre JI, Miley HS, Stoehlker U, **Widodo S**, Woods VT; Source term estimates of radioxenon released from the BaTek medical isotope production facility using external measured air concentrations. *Journal of environmental radioactivity*. 2015;148:10–15.
 21. **Widodo S**, Iskandar D. Environmental radiation and radioactivity levels in Indonesia. *Proceeding International Conference on the Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*; Bali, 10–11 Oktober 2013. 2014:143–153.
 22. Purwajati S, Budiantari T, Hartoyo P, **Widodo S**. Analisis hasil kalibrasi surveymeter menggunakan sumber ^{137}Cs terkolimasi dan panoramik. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir*; Yogyakarta, 27 November 2017(1918):441-446.
 23. **Widodo S**. *Litbang akselerator partikel: Perkembangannya di Indonesia*. Yogyakarta: Penerbit Lintang Pustaka Utama; 2018.
 24. **Widodo S**, Bastianudin A, Triatmoko IM, Pudjorahardjo DS, Diah FI, Adabiah SR, Andriyanti W, Mulyani E, Wijaya GS. Policy review on research, development, and applications of accelerator in Indonesia. *AIP Conference Proceedings* 2381; 2021:020106. <https://doi.org/10.1063/5.0066284>
 25. Sardjono Y, **Widodo S**, Irhas I, Tantawy H. A design of boron neutron capture therapy for cancer treatment in Indonesia. *Indonesian Journal of Physics and Nuclear Applications*. 2016;1(1):1-13.
 26. Khanifah L, **Widodo S**, Widarto W, Putra NMD, Satrio A. Characteristics of paraffin shielding of Kartini Reactor, Yogyakarta. *ASEAN Journal on Science & Technology for Development*. 2018;35(3):195–198.
 27. Syarip, Wahyono PI, **Widodo S**, Donny K. Commissioning preparation of a subcritical experimental facility for ^{99}Mo Production. *Journal of Physics Conf. Series* 1198(2);2019:022023.

28. Syarip, **Widodo S**, Muzakky, Sukirno. Measurement and Analysis of ^{233}U from local thorium by using gamma spectrometry and DNCS methods. *Journal of Physics: Conf. Series* 1204; 2019:012005.
29. Sutresna WG, **Widodo S**. Environmental radioactivity and hazardous index around nuclear research reactor Yogyakarta. Proceeding 2nd International Conference on the Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation (SERIR2016) & 14th Biennial Conference of South Pacific Environmental Radioactivity Association (SPERA2016). Center for Technology of Radiation Safety and Metrology, National Atomic Energy Agency; Bali, 2016:12–17.
30. Jumari J, Supriyanto N, Aditresno H, **Widodo S**. Construction of digital survey meter model smd-03 using atmega 8 microcontroller. *Journal of Physics Conference Series*. 2020;1436(1):012065.
31. **Widodo S**, Abimanyu A, Apribra R. Development of drone mounted aerial gamma monitoring system for environmental radionuclide surveillance in BATAN. *Journal of Physics Conference Series* 1436(1); 2020:01212.
32. Townsend JS. The conductivity produced in gases by the motion of negatively charged ions. *Phil. Mag.* 1901;6(1):198–227.
33. Molinié P, Boudia S. Mastering picocoulombs in the 1890s: the Curies' quartz–electrometer instrumentation, and how it shaped early radioactivity history. *Journal of Electrostatics*. 2009; 67(2–3):524–530. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2009.01.031>
34. Rutherford E, Geiger H. An electrical method of counting the number of α particles from radioactive substances. *Proceedings of the Royal Society (London) Series A*. 1908;81(546):141–161. <https://doi.org/10.1098/rspa.1908.0065>
35. Rutherford E. Radium Standards and Nomenclature. *Nature*. 1910;84:430–431. <https://doi.org/10.1038/084430a0>
36. Terrien J. News from the Bureau International des Poids et Mesures. *Metrologia*. 1975;11(4):179.

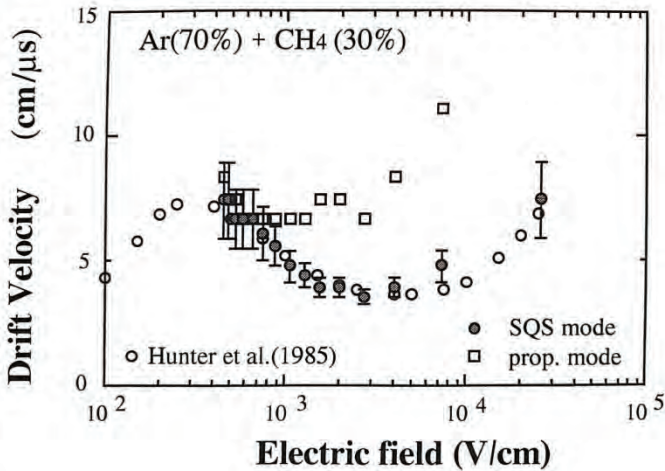
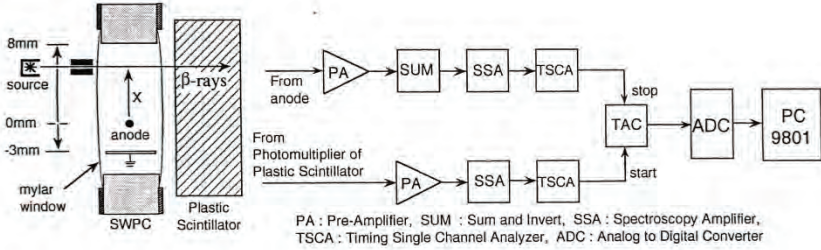
37. Geiger H, Müller W. *Elektronenzählrohr zur messung schwächster aktivitäten (Electron counting tube for the measurement of the weakest radioactivities). Die Naturwissenschaften. 1928;16(31):617–618. <https://doi.org/10.1007/BF01494093>*
38. Crookes W. Certain Properties of the emanations of radium. *Chemical News. 1903;87:241.*
39. Curran SC, Craggs JD. *Counting tubes: theory and applications. Academic Press; 1949.*
40. Knoll GF. *Radiation detection and measurement. John Wiley & Sons; 1979.*
41. Pujadi M, Wardiyanto G, Wijaya I, Nazar, Sudarsono. Standardisasi ^{90}Sr secara absolut memakai detektor proporsional $4\pi(\text{PC})$. *Prosiding Presentasi Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Lingkungan VIII; 2000:169–175.*
42. Wurdianto G, Chandra H, Agusbudiman A. The absolutely standardization methods of ^{153}Sm for calibrating nuclear medicine instruments in Indonesia. *Journal of Applied Physical Science International. 2019;10(5):241–246.*
43. **Widodo S**, Juita E, Yudiantoro D, Zaenuddin M, Sumadi W. Kalibrasi detektor Si(Li) untuk sinar-x/ γ energi rendah. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah PPNY-BATAN; Yogyakarta, 23–25 April 1996.*
44. Michotte C, Courte S, Nonis M, Coulon R, Judge S, Alekseev IV, Zanevsky AV, Zhukov GV. Update of the BIPM comparison BIPM. RI (II)-K1. Co-60 of activity measurements of the radionuclide ^{60}Co to include the 2019 result of the VNIIM (Russian Federation). *Metrologia. 2021;58:06019.*
45. Rytz A. Activity concentration of a solution of ^{137}Cs : An international comparison. *Nuclear instruments and methods in physics research, Section A: accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment. 1985;228(2–3):506–511.*
46. Juita E, Nazarah, Sunaryo, Wurdianto G, Sudarsono, **Widodo S**, Pujadi M. Antarbanding pengukuran aktivitas isotop ^{57}Co dan ^{131}I . *Prosiding Presentasi Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Lingkungan; Jakarta, 20–21 Agustus 1996:75–80.*

47. Nazaroh K, Wurdianto G, Holnizar H, Sudarsono S, **Widodo S**, Juita E. Interkomparasi pengukuran aktivitas I-125 antara PSPKR dan Electro-technical Laboratory (Jepang). *Prosiding Presentasi Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Lingkungan VI*; Jakarta, 2–3 September **1998**:92–102.
48. Wurdianto G, Pujadi M, **Widodo S**, Iskandar D, Hartoyo U, Sutresna IG, dkk. National comparison of activity measurements of ^{131}I , ^{60}Co , and ^{133}Ba in Indonesia. *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*. 2014;87:414–417.
49. BIPM. CIPM MRA Participants [internet]; 1 Mei 2021. <https://www.bipm.org/en/countries/id>
50. Matoba M, Tsuji K, Marubayashi K, Shintake T, Ikegami H, Yamazaki T, Morinobu S, Katayama I, Fujiwara M, Fujita Y. A 1.5-m Single Wire Position Sensitive proportional counter for a magnetic spectrograph with a large dispersion. *Nucl. Instrum. Methods*. 1981;180:419–427. [https://doi.org/10.1016/0029-554X\(81\)90082-3](https://doi.org/10.1016/0029-554X(81)90082-3)
51. スシロウイドド **Widodo S**、菊澤信宏 Kikuzawa N、藤井貴志 Fujii T、久保龍 Kubo R、魚住裕介 Uozumi Y、井尻秀信 Ijiri H、dkk. Kyushu Focal-Plane Detector System for Spectrograph RAIDEN: Present Status and Future. 第三回放射線計測研究会論文集 Proceedings of the 3rd Radiation Measurement Study Group 1989; 1990(05):92–100.
52. Watanabe Y, Kashimoto H, Hane H., Aoto A, Koori N, Nohtomi A, **Widodo S**, Iwamoto O, Yamaguchi R, Sagara K, Nakamura H, Maeda K, Nakashima T. Polarized proton induced breakup of ^{12}C at 14 and 16 MeV. Dalam: Qaim SM, editor. *Nuclear data for science and technology*; 1992:1002–1004.
53. Uozumi Y, Ijiri H, **Widodo S**, Sakae T, Matoba M, Koori N. Neon-based gas mixtures for proportional counters. *J. Nucl. Sci. and Tech.* 1991;28(5):381–388.
54. Koori N, Nohtomi A, Yoshioka K, Sakae T, Matoba M, Uozumi Y, **Widodo S**. A Self-quenched Streamer Tube Operated with Ne- and He-mixtures. *Nucl. Inst. and Meth. A*. 1990;299(1–3):80–84.

55. Ijiri H, Watanabe Y, Uozumi Y, Nohtomi A, **Widodo S**, Sakae T, dkk. Generation of SQS in quenching Gas (CH_4) of Proportional Counter and related problems. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1992;39(4):724–727.
56. **Widodo S**, Nohtomi A, Uozumi Y, Sakae T, Ijiri H, Koori N, Matoba M. Measurements of electron drift characteristics in single wire gas counter in self-quenching streamer transition region. Journal of Nuclear Science and Technology. 1992;29(8):745–752.
57. Nohtomi A, Hashimoto K, **Widodo S**, Uozumi Y, Sakae T, Matoba M, dkk. Significance of Ionization-track contribution to self-quenching streamer (SQS) formation induced by alpha-rays. Journal of Nuclear Science and Technology. 1992;29(5) :490–492.
58. Uozumi Y, Ijiri H, **Widodo S**, Sakae T, Koori N, Matoba M. Position sensing with Ne-based gases in the SQS transition region. Nucl. Instr. and Meth. A. 1990;299(1-3):102–104.
59. **Widodo S**, Nohtomi A, Sakae T, Matoba M, Ijiri H, Uozumi Y, dkk. Electron drift characteristic in single wire proportional counter and its applicability to simple vertical position monitor. Journal of Nuclear Science and Technology. 1991;28(4):339–343.
60. Charpak G, Bouclier R, Bressani T, Favier J, Zupancic C. The use of multiwire proportional counters to select and localize charged particles. Nucl. Instr. Meth. 1968;62: 262–268.
61. **Widodo S**. Study on the electron drift characteristics in position sensitive gas counters 位置検出型気体計数管における電子ドリフト特性に関する研究 [tesis]. [Kyushu]: Department of Applied Nuclear Physics, Faculty of Nuclear Engineering, Kyushu University; 1993.
62. **Widodo S**. Study on the electron drift characteristics in position sensitive gas counters. Abstracts of 1992 AESJ Awards. Journal of Nuclear Science and Technology. 1993;30(4):373–386. DOI: 10.1080/18811248.1993.9734494.

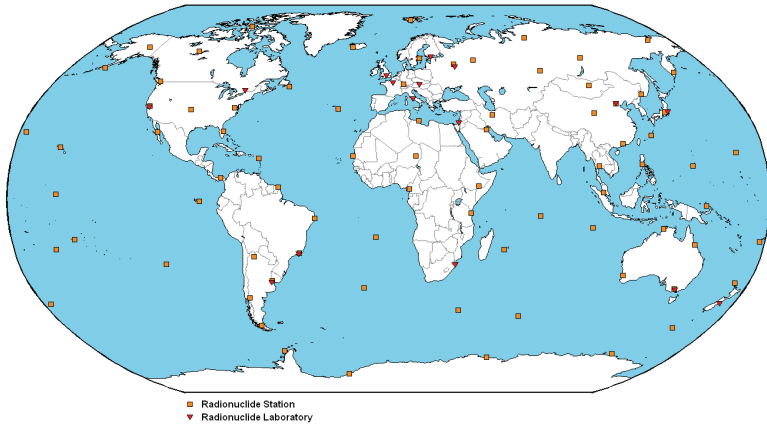
63. PrepCom CTBTO. Operational manual for radionuclide monitoring and the international exchange of radionuclide data: draft. CTBT/WGB/TL-11,17/18/Rev.5; 10 Desember 2010.
64. PrepCom CTBTO. The CTBT noble gas verification component. CTBTO Spectrum 8; Juli 2006. https://www.ctbto.org/fileadmin/content/reference/outreach/spectrum_issues_singles/ctbto_spectrum_8/p22_23.pdf
65. CTBTO. Joining forces to reduce radioxenon emmissions. CTBTO Spectrum 21; September 2013. https://www.ctbto.org/fileadmin/user_upload/pdf/Spectrum/2013/Spectrum21_p18.pdf.
66. **Widodo S**, Iskandar D, Syarbaini S, Bunawas B. development of radionuclide monitoring stations in Indonesia in anticipating the increasing of peaceful uses of nuclear energy in ASEAN Region- an initial assessment. The International Conference on Basic Science 2011; 2011:275.
67. Bowyer TW. A review of global radioxenon background research and issues. *Pure Appl. Geophys.* 2020;178:2665–2675. <https://doi.org/10.1007/s00024-020-02440-0>
68. **Widodo S**, Wahyudi W, Wiyono M, Pudjadi E, Iskandar D, Syarbaini S. Survey of prospective locations for radionuclide monitoring stations in Indonesia; a Preliminary Site Assessment. *AIP Conference Proceedings*; 2022.
69. Syarbaini S, Bunawas B, Susila IP. Design and development of carborne survey equipment. *Atom Indonesia.* 2015;41(2):97–102. <https://doi.org/10.17146/ajj.2015.383>

LAMPIRAN



Gambar 1 Susunan Peralatan untuk Penelitian Karakteristik *Drift* Elektron dalam Detektor Isian Gas (Atas) dan Contoh Hasil Pengukuran Kecepatan *Drift* Elektron (Bawah)⁶¹

INTERNATIONAL MONITORING SYSTEM
RADIONUCLIDE NETWORK



Gambar 2 Peta lokasi 80 sistem pemantau radionuklida, tidak ada satu pun di Indonesia CTBTO².

DAFTAR PUBLIKASI ILMIAH

Buku

1. **Widodo S.** Litbang akselerator partikel: perkembangannya di Indonesia. Yogyakarta: Lintang Pustaka Utama; 2018.
2. Suprpto, **Widodo S.** Pengenalan teknologi vakum. Pustaka Pelajar; 2017
3. **Widodo S,** Purwani MV, Suyanti, Sudibyoy, Syarip, Muzakky. Dari pasir monasit ke thorium: bahan baku bahan bakar nuklir dan radioisotope medik, cetakan ii; 2019.

Bagian dari Buku

4. **Widodo S,** Wijaya GS, Setiyadi D, Suharni. Aspek keselamatan radiasi dalam pengoperasian siklotron medik. Siklotron medik: teknologi, operasi dan perawatannya, edisi revisi. Yogyakarta: Lintang Pustaka Utama; 2019.
5. Awaluddin R, Kambali I, Mulyani E, **Widodo S.** Aplikasi siklotron untuk produksi radionuklida medik. Siklotron medik: teknologi, operasi dan perawatannya. Yogyakarta: Lintang Pustaka Utama; 2019.
6. **Widodo S.** Optimasi proteksi radiasi dan keselamatan radiasi pembatas dosis pada Pilot Plant BNCT. Analisis paparan radiasi daerah kerja dan lingkungan pada kondisi normal dan abnormal Pilot Plant Boron Neutron Capture Cancer Therapy. Yogyakarta: Lintang Pustaka Utama; 2016.
7. **Widodo S.** Analisis dosis internal pada pekerja radiasi pada Pilot Plant BNCT. Analisis nilai dosis pekerja radiasi Pilot Plant Boron Neutron Capture Cancer Therapy. Yogyakarta: Lintang Pustaka Utama; 2015.

Jurnal Internasional

8. Khanifah L, **Widodo S**, Widarto W, Putra NMD, Satrio A. Characteristics of paraffin shielding of Kartini Reactor, Yogyakarta. ASEAN Journal on Science & Technology for Development. 2018;35(3):195–198.
9. McIntyre JI, Budiman AA, Cameron IM, Dumais JR, Eslinger PW, ..., **Widodo S**, dkk. Real-time stack monitoring at the BaTek medical isotope production facility. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. 2016;308:311–316.
10. Eslinger PW, Cameron IM, Dumais JR, Imardjoko Y, Marsoem P, ..., **Widodo S**, dkk. Source term estimates of radioxenon released from the BaTek medical isotope production facility using external measured air concentrations. Journal of Environmental Radioactivity. 2015;148:10–15.
11. Wurdianto G, Marsoem P, **Widodo S**, Iskandar D, Hartoyo U, Sutresna IG, dkk. National comparison of activity measurements of ^{131}I , ^{60}Co , and ^{133}Ba in Indonesia. International Journal of Applied Radiation and Isotopes. 2014;87:414–417.
12. Matoba M, Yamaguchi K, Kurohmaru K, Iwamoto O, **Widodo S**, Nohtomi A, dkk. Depletion of the $2f_{7/2}$ neutron hole state in ^{207}Pb . Phys. Rev. C, 10.1103. 1997; C.55(6):3152–3154.
13. Uozumi Y, Iwamoto O, **Widodo S**, Nohtomi A, Sakae T, Matoba M, dkk. Single-particle strengths measured with $^{48}\text{Ca}(\text{pol.d,p})^{49}\text{Ca}$ Reaction at 56 MeV. Nuclear Physics A. 1994;576(1):123–137.
14. Hisamochi K, Iwamoto O, Kisanuki A, Budihardjo S, **Widodo S**, Nohtomi A, dkk. Hole strengths and spreading widths observed in $^{92}\text{Mo}(\text{pol.p,d})^{91}\text{Mo}$ reaction at 65 MeV. Nuclear Physics A. 1993;564(2):227–251.
15. **Widodo S**, Nohtomi A, Uozumi Y, Sakae T, Ijiri H, Koori N, dkk. Measurements of electron drift characteristics in single wire gas counter in self-quenching streamer transition region. Journal of Nuclear Science and Technology. 1992;29(8):745–752.

16. Nohtomi A, Hashimoto K, **Widodo S**, Uozumi Y, Sakae T, Matoba M dkk. Significance of ionization-track contribution to self-quenching streamer (SQS) formation induced by alpha-rays. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 1992;29(5):490–492.
17. **Widodo S**, Nohtomi A, Sakae T, Matoba M, Ijiri H, Uozumi Y, dkk. Electron drift characteristic in single wire proportional counter and its applicability to simple vertical position monitor. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 1991;28(4):339–343.
18. Uozumi Y, Ijiri H, **Widodo S**, Sakae T, Matoba M, Koori N. Neon-based Gas Mixtures for Proportional Counters. *J. Nucl. Sci. and Tech.* 1991;28(5):381–388.
19. Uozumi Y, Ijiri H, **Widodo S**, Sakae T, Koori N, Matoba M. Position sensing with Ne-based gases in the SQS transition region. *Nucl. Inst. and Meth. A*. 1990;299(1–3):102–104.
20. Koori N, Nohtomi A, Yoshioka K, Sakae T, Matoba M, ..., **Widodo S**. A self-quenched streamer tube operated with Ne- and He-mixtures. *Nucl. Inst. and Meth. A*. 1990;299(1-3):80–84.

Jurnal Nasional

21. Sardjono Y, **Widodo S**, Irhas, Tantawy H. A design of boron neutron capture therapy for of cancer treatment in Indonesia. *Indonesian Journal of Physics and Nuclear Applications*. 2016;1(1):1–13.
22. **Widodo S**. Self quenching streamer (SQS) mode: perkembangan baru detector gas. *Majalah BATAN*. 1988;XXI(3–4):43–55.
23. **Widodo S**, Sunaryo, Juita E, Mulyono E. Standardisasi I-131 di PSPKR BATAN. *Majalah BATAN*. 1986;XIX(4):29–39.
24. **Widodo S**. Spektroskopi alpha dengan pencacah sawar muka. *Majalah BATAN*. 1985;XVIII(4):71–84.
25. **Widodo S**. Pengukuran aktivitas secara absolut sumber-sumber standar buatan PDS. *Majalah BATAN*. 1984;XVII(1):37–48.
26. **Widodo S**, Sunaryo. Penentuan tegangan kerja optimum pencacah $4\pi\beta$ secara cepat dengan metode Houtermans. *Majalah BATAN*. 1982;XV(4):10–17.

Prosiding Internasional

27. **Widodo S**, Wahyudi, Wiyono M, Pudjadi E, Iskandar D, Syarbaini. Survey of prospective locations for radionuclide monitoring stations in Indonesia; a preliminary site assessment. *AIP Conference Proceedings* 2501; 2022:020017. <https://doi.org/10.1063/5.0095964>
28. Hastuti T, **Widodo S**, Krishyana H, Margono F, Akbar H. Public policy perspectives on the utilization of nuclear power plants in supporting sustainable development in Indonesia. *Advances in Science and Technology* 112; 2022:155–162. <https://doi.org/10.4028/p-ip2k7p>
29. **Widodo S**, Bastianudin A, Triatmoko IM, Pudjorahardjo DS, Diah FI, Adabiah SR, dkk. Policy Review on Research, Development, and Applications of Accelerator in Indonesia. *AIP Conference Proceedings* 2381; 2021:020106. <https://doi.org/10.1063/5.0066284>
30. **Widodo S**, Abimanyu A, Apribra R. Development of drone mounted aerial gamma monitoring system for environmental radionuclide surveillance in BATAN. *Journal of Physics Conference Series* 1436.1; 2020:01212.
31. Jumari, Supriyanto N, Aditresno H, **Widodo S**. Construction of digital survey meter model smd-03 using atmega 8 microcontroller. *Journal of Physics Conference Series* 1436.1;2020:012065.
32. Syarip, Wahyono PI, **Widodo S**, Donny K. Commissioning preparation of a subcritical experimental facility for ^{99}Mo production. *Journal of Physics Conference Series* 1198 (2); 2019:022023. DOI: 10.1088/1742-6596/1198/2/022023.
33. Taxwim, Wahyono PI, Biddinika MK, **Widodo S**, Aziz M, Takahashi F. Strengthening scientific literacy on nuclear reactor and its application through nuclear school. *Journal of Physics: Conf. Series* 1175; 2019:012168.
34. Syarip, **Widodo S**, Muzakky, Sukirno. Measurement and analysis of ^{233}U from local thorium by using gamma spectrometry and DNCS methods. *Journal of Physics: Conf. Series* 1204; 2019:012005.

35. Wijaya GS; **Widodo S**. Environmental radioactivity and hazardous index around Nuclear Research Reactor Yogyakarta. Proceeding 2nd International Conference on the Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation (SERIR2016) & 14th Biennial Conference of South Pacific Environmental Radioactivity Association (SPERA2016). Center for Technology of Radiation Safety and Metrology, National Atomic Energy Agency; Bali, 2016:12–17.
36. **Widodo S**, Iskandar D. Environmental radiation and radioactivity levels in Indonesia [keynote presentation]. Proceeding International Conference on the Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation; 10–11 Oktober 2013; Bali; 2014:143–153.
37. **Widodo S**; Syarbaini, Iskandar D, Bunawas. Development of radionuclide monitoring stations in Indonesia in anticipating the increasing of peaceful uses of nuclear energy in ASEAN Region: an initial assessment. Proceeding of the International Conference on Basic Science; Malang: Galaxy Science Publisher; 2011:275–279.
38. **Widodo S**, Iwamoto O, Nohtomi A, Uozumi Y, Sakae T, Ijiri H, dkk. Electron drift measurements using self-quenching streamer mode in single wire gas counter. IEEE Conference on Nuclear Science Symposium and Medical Imaging; 1992:192–194. DOI: 10.1109/NSSMIC.1992.301105.
39. Ijiri H, Watanabe Y, Uozumi Y, Nohtomi A, **Widodo S**, Sakae T, dkk. Generation of SQS in quenching gas (CH₄) of proportional counter and related problems. IEEE Transactions on Nuclear Science, 39.4; 1992:724–727.
40. Ijiri H, Uozumi Y, Ikematsu S, Nohtomi A, **Widodo S**, Sakae T. Some Topics on Gas Counter Operation. Proceedings of the 6th Workshop on Radiation Detectors and Their Uses, KEK 91-5; 1991:58–65.
41. Watanabe Y, Kashimoto H, Hane H, Aoto A, Koori N, ..., **Widodo S**, dkk. Polarized proton induced breakup of ¹²C at 14 and 16 MeV”. Dalam: Qaim SM, editor. Nuclear Data for Science and Technology; 1992:1002–1004.

42. Koori N, Watanabe Y, Kashimoto H, Hane H, Aoto A, ..., **Widodo S**, dkk. Polarized proton induced breakup of ^{12}C at 16 MeV. JAERI-M 92-029; 1992.
43. Ikematsu S, Yamaguchi R, Kisanuki A, **Widodo S**, Ouzumi Y, Sakae T, dkk. 電界補強用電極付き位置 検出型単芯線比 例計数管 Position sensitive single wire proportional counter with electrodes for increasing electric field strength. Engineering Sciences Report Kyushu University 13.1; 1991:37–43. <https://doi.org/10.15017/17220>
44. Kikuzawa N, Kugimiya H, Fujii T, **Widodo S**, Uozumi Y, Ohgaki H, dkk. 小型超伝導AVFサイクロトロン の磁場設計 The magnetic field design of a compact superconducting AVF cyclotron. Engineering Sciences Report Kyushu University 11.2; 1989:207–211. <https://doi.org/10.15017/17151>
45. Watanabe Y, Koori N, Kashimoto H, Hane H, Aoto A, ..., **Widodo S**, dkk. Four body breakup reaction on ^{12}C induced by polarized proton. Proc of the 1990 Seminar on Nuclear Data, JAERI; 29–30 November 1990.
46. Sajima T, Kubo R, Motomura N, **Widodo S**, Kugimiya H, Fujii T, dkk. LANベースオンライン多次元多事象リストデータ 収集処理システムの開発 Development of a LAN based on line list data acquisition and analysis system for multi dimensional multi events. Kyushu University, Engineering Sciences Report 11.1; 1989:33–38. <https://doi.org/10.15017/17138>
47. Kubo R, Sajima T, Motomura N, Kugimiya H, **Widodo S**, Fujii T, dkk. ガス計数管動作ガスとしてのネオンベースガスの特性 Characteristics of the Ne-based Gases as a Counter Filling Gas. Kyushu University, Engineering Sciences Report 11.1; 1989:39–46. <https://doi.org/10.15017/17139>
48. スシロウイドド **Widodo S**, 菊澤信宏 Kikuzawa N, 藤井貴志 Fujii T, 久保龍二 Kubo R, 魚住裕介 Uozumi Y, 井尻秀信 Ijiri H, dkk. Kyushu focal-plane detector system for spectrograph RAIDEN: present status and future 第三回放射線計測研究会論文集 Proceedings of the 3rd Radiation Measurement Study Group 1990.05; 1989: 92–100.

Prosiding Nasional

49. Muhammad S, **Widodo S**, Djarwanti RRPS. Kajian keselamatan untuk daur ulang zat radioaktif terbungkus Cesium-137. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir; Yogyakarta, 28 November 2017:193–198.
50. Purwajati S, Budiantarari CT, Hartoyo P, **Widodo S**. Analisis hasil kalibrasi surveymeter menggunakan sumber ^{137}Cs terkolimasi dan panoramik. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir; Yogyakarta, 27 November 2017:441–446.
51. **Widodo S**, Muhammad S, Djarwanti RRPS. Kajian proses daur ulang zat radioaktif terbungkus cobalt-60 yang sudah tidak digunakan untuk logging minyak dan batubara. Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XV; Jakarta, 2017:57–68.
52. **Widodo S**. Penerapan ketidakpastian pengukuran dalam regulasi ketenaganukliran. Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir 2017; Yogyakarta: Bapeten; 2017:145–152.
53. **Widodo S**, Akhadi M. Sistem dosimetri 1986 (DS86) untuk para korban bom atom dan masalahnya. **Prosiding Presentasi Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Lingkungan VI**; Jakarta, 2–3 September 1998:76–85.
54. Nazaroh, Wurdianto G, Holnizar, Sudarsono, **Widodo S**, Juita E. Interkomparasi pengukuran aktivitas I-125 antara PSPKR dan Electro-technical Laboratory (Jepang). **Prosiding Presentasi Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Lingkungan VI**; Jakarta, 2–3 September 1998:92–102.
55. Juita E, Nazaroh, Sunaryo, Wurdianto G, Sudarsono, **Widodo S**, dkk. Antarbanding pengukuran aktivitas isotop ^{57}Co dan ^{131}I , Prosiding Presentasi Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Lingkungan; Jakarta, 20–21 Agustus 1996:75–80.
56. **Widodo S**, Juita E, Nazaroh, Yudiantoro D, Zaenuddin, Sumadi W. Kalibrasi detektor Si(Li) untuk sinar-X/ γ energi rendah.

Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah PPNY-BATAN;
Yogyakarta, 23–25 April 1996.

57. **Widodo S.** Electron drift characteristics in position sensitive gas counters. Risalah Presentasi Ilmiah Hasil Studi Program Doktor, Badan Tenaga Atom Nasional; 7–8 Desember 1993; Jakarta; 1995:273–303.
58. Pudjadi, **Widodo S**, Sunaryo, Sudarsono, Juita E, Nazaroh. Antarbanding pengukuran aktivitas Co-57 antara PSPKR dengan beberapa rumahsakit: unjuk kerja dan kalibrasi kalibrator dosis. Prosiding Seminar Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Kesehatan; Jakarta, 23–24 Agustus 1994:54–57.
59. **Widodo S**, Iwamoto O, Nohtomi A, Hisamochi K, Kisanuki A, Budihardjo S, Sakae T, dkk. $^{208}\text{Pb}(p,d)^{207}\text{Pb}$ reaction at 65 MeV. Prosiding Symposium HFI; Bandung: ITB; 1993.
60. **Widodo S**, Wiharto K. Hormersis radiasi pada manusia; suatu dugaan. Presentasi Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Lingkungan; Jakarta, 18–19 Agustus 1993:476–484.

DAFTAR PUBLIKASI LAINNYA

1. **Widodo S.** HIMNI and nuclear energy development in Indonesia. The 19th International Conference on Emerging Nuclear Energy System (ICENES2019); Bali, 6–9 Oktober 2019.
2. **Widodo S.** Pemantauan radiasi dan radioaktivitas di atmosfer: national and global monitoring. Prosiding Seminar Nasional Keselamatan Kesehatan dan Lingkungan VI; Jakarta, 15–16 Juni 2010.
3. **Widodo S.** Perkembangan pemanfaatan energi nuklir di Jepang dan permasalahannya. Seminar Nasional VIII Studi Jepang dan Rakernas III ASJI, Universitas Sam Ratulangi, Manado; 26 November 1997.
4. **Widodo S.** Pernyataan tentang keakuratan hasil pengukuran aktivitas zat radioaktif. Buletin ALARA. 1997;1(2):41–48.
5. **Widodo S.** Detektor radiasi nuklir dan prospek aplikasinya di Indonesia. Jumpa Pers Pokja Ristek di PSPKR-BATAN, Pasar Jumat; Jakarta, 22 Desember 1994.
6. **Widodo S.** Metode baru untuk pengukuran kecepatan drift elektron dengan detektor gas yang dioperasikan pada mode SQS (Self-Quenching Streamer) [presentasi finalis]. Kompetisi Karya Ilmiah Peneliti Muda LIPI; Jakarta, 1993.
7. **Widodo S.** Study on the electron drift characteristics in position sensitive gas counters 位置検出型気体計数管における電子ドリフト特性に関する研究 [disertasi]. [Kyushu]: Department of Applied Nuclear Physics, Faculty of Nuclear Engineering, Kyushu University; 1993.
8. **Widodo S.** 大型スペクトログラフ用焦点面検出器の開発研究 Research and development of focal-plane detector system for a large magnetic spectrograph [tesis]. [Kyushu]: Department of Energy Conversion Engineering, Graduate School of Engineering Sciences, Kyushu University; 1990.

9. **Widodo S.** Pengukuran aktivitas secara absolut dengan metode koinidensi $4\beta\text{-}\gamma$ [skripsi]. Jurusan Fisika FIPIA Universitas Indonesia; 1982.
10. **Widodo S.** Aspek keselamatan lingkungan suatu instalasi nuklir [skripsi sarjana muda]. Jurusan Fisika FIPIA Universitas Indonesia; 1980.
11. **Widodo S,** Taxwim. Current operational status of Kartini Nuclear Reactor and other facilities in MBA-RI B (PSTA-BATAN), Yogyakarta. Indonesian Safeguards Implementation Meeting; Jakarta, 10 Mei 2017.
12. **Widodo S.** Review on the safety infrastructure readiness in Indonesia during and after Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. The IAEA Technical Meeting on Lessons Learned and Safety Improvements Related to External Hazards Based on the IAEA Fukushima Daiichi Accident Report; Vienna, Austria, 23–25 November 2016

Paten

1. Sardjono Y, Widarto, Wijaya GS, Triatmoko IM, Adi Y, **Widodo S,** dkk. Komponen shielding aperture berbahan baku timbal (Pb). No. Pendaftaran Paten P00201911463. 2019 Desember 6.
2. Prayitno, Sardjono Y, **Widodo S.,** Wijaya GS, Widarto, Triatmoko IM. dkk. Sistem pengolahan sumber daya alam berbasis mineral dengan elektrokoagulator. Paten Indonesia No. IDP000071438. 2020 September 17.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

A. Data Pribadi

Nama Lengkap : Susilo Widodo
Tempat/Tanggal Lahir : Yogyakarta/14 April 1958
Anak ke : 2 dari 9 bersaudara
Nama Ayah Kandung : Payar Notowidiarso
Nama Ibu Kandung : Suwarsi
Nama Istri : Sri Rahayu
Jumlah Anak : 3 orang
Nama Anak : 1. Wahyu Ramadhanni Umareta
2. Wahyu Anggoro Chihayanto
3. Nastia Siti Deviena Widodo
Nama Instansi : Badan Riset dan Inovasi Nasional
Judul Orasi : Pengembangan Sistem Deteksi Radionuklida untuk Mendukung Pelarangan Uji Coba Nuklir
Bidang Keahlian : Fisika Radiasi
No. SK Pangkat Terakhir : Keppres No. 88/K Tahun 2013, tanggal 1 Oktober 2013, TMT 1 Oktober 2013
No. SK Peneliti Ahli Utama : Keppres No. 3/M tahun 2022, tanggal 19 Januari 2022, TMT 1 Oktober 2022

B. Pendidikan Formal

No.	Jenjang	Nama Sekolah/ PT/ Universitas	Tempat/Kota/ Negara	Tahun Lulus
1	SD	SD Negeri I Sentolo, Kulon Progo	Yogyakarta, Indonesia	1970
2	SMP	SMP Negeri I Sentolo, Kulon Progo	Yogyakarta, Indonesia	1973
3	SMA	SMA Negeri I	Yogyakarta, Indonesia	1976
4	Sarjana Muda	Universitas Indonesia	Jakarta, Indonesia	1980
5	S-1	Universitas Indonesia	Jakarta, Indonesia	1982
6	S-2	Kyushu University	Fukuoka, Jepang	1990
7	S-3	Kyushu University	Fukuoka, Jepang	1993

C. Pendidikan Nonformal

No.	Nama Pelatihan/Pendidikan	Tempat/Kota/Negara	Tahun
1	Integrated Quality Management System ISO 9001:2008 and ISO/IEC 17025:2005, AN-Training & Cosulting	Yogyakarta, Indonesia	2014
2	Train of Trainers on the Power of Public Speaking and Media Relationship	Jakarta, Indonesia	2011
3	Training Course on Physical Protection and Security Management of Radioactive Sources	Jakarta, Indonesia	2010
4	Training on Radiological Emergency Preparedness and Response, ANSTO	Sydney, Australia	2009

No.	Nama Pelatihan/Pendidikan	Tempat/Kota/Negara	Tahun
5	Designing Competencies for Laboratory Personnel: ISO/IEC 17025:2005 Requirements, AN Training	Jakarta, Indonesia	2008
6	OSI- ARCS Equipment Testing and Evaluation Exercise	Seibersdorf, Austria	2006
7	OSI Directed Exercise 2005 (DE-05), Semipalatinks Nuclear Test Sites	Semipalatinks, Kazakhstan	2005
8	OSI Field Experiment, Semipalatinks Nuclear Test Site	Semipalatinks, Kazakhstan	2002
9	OSI Field Experiment and Equipment Testing	Bratislava, Slovakia	2001
10	OSI Experimental Advanced Course Related to the Comprehensive Nuclear-Test Ban Treaty	Paris, France	2001
11	OSI Table Top Exercise	Vienna, Austria	1999
12	Training Course on Radiation Measurements, IAEA	Jakarta, Indonesia	1995
13	Metodologi Riset	Jakarta, Indonesia	1985
14	Job Training on Radiation Safety and Standardization, KFA Juelich GmbH and PTB	Joelich and Brauns -weig, West-Germany	1984-1985

D. Jabatan Struktural

No.	Jabatan/Pekerjaan	Nama Instansi	Tahun
1	Staf Peneliti	Pusat Dosimetri dan Standardisasi–BATAN	1980–1993
2	Lakjab Kepala Balai Instrumentasi Radiasi	Pusat Standardisasi dan Penelitian Keselamatan Radiasi BATAN	Juli 1993–Agustus 1994
3	Kepala Bidang Standardisasi	Pusat Standardisasi dan Penelitian Keselamatan Radiasi BATAN	Agustus 1994–Mei 1998
4	Equipment Officer	Preparatory Commission for the CTBTO	Mei 1998–Mei 2007
5	Kepala Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi	Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi BATAN	Juli 2007–Januari 2014
6	Kepala Pusat Sains dan Teknologi Akselerator	Pusat Sains dan Teknologi Akselerator BATAN	Januari 2014–2018

E. Jabatan Fungsional

No.	Jenjang Jabatan	TMT Jabatan
1	Staf Peneliti (Fungsional Umum)	1980
2	Ajun Peneliti Muda	1993
3	Peneliti Muda	1995
4	Peneliti Madya	1997
5	Berhenti Sementara (penugasan di LN)	1998
6	Peneliti Madya (aktif kembali tanpa pengusulan Dupak)	2007
7	Berhenti sementara (menjabat JPT)	2009
8	Peneliti Ahli Utama	2017

F. Penugasan Khusus Nasional/Internasional

No.	Jabatan/Pekerjaan	Tahun
1	Ketua Tim Penyusunan Rencana Strategik PSTA-BATAN 2020-2024	2019, 2020
2	Delegasi RI dalam Radiation Emergency Medical Preparedness Assisstant Network (REMPAN)-WHO	2014-2016
3	Anggota Komite Standar Nasional Satuan Ukuran (KSNSU)-BSN	2013-2014
4	Penanggungjawab Pelaksanaan Kerja Sama Internasional BATAN-UNSCEAR	2013
5	Ketua Merangkap Anggota Tim Penilai Jabatan Fungsional Penyelidik Bumi dan Pengendali Dampak Lingkungan Badan Tenaga Nuklir Nasional	2013
6	Delegasi RI dalam Sidang United Nation Scientific Committee on Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)	2011-2013
7	Anggota Tim Kerja Peningkatan Kualitas Pelayanan Publik-BATAN	2011
8	National Program Coordinator dalam RAS-6/053: Improving Image Based on Radioation Therapy for Common Cancers in the RCA Region	2010-2014
9	Anggota Tim Kerja Reformasi Birokrasi di Lingkungan Badan Tenaga Nuklir Nasional	2010, 2011, 2012, 2013
10	Anggota Tim Koordinasi Monitoring dan Evaluasi Pelaksanaan Instruksi Presiden No.5 Tahun 2004	2010
11	Anggota Panitia Seminar Nasional Manajemen Risiko Bidang K3	2010
12	Anggota Panitia Nasional Bulan K3 Nasional	2009, 2010, 2011, 2012

No.	Jabatan/Pekerjaan	Tahun
13	Anggota Tim Penyusun Renstra BATAN 2010-2014	2009
14	Delegasi RI dalam Asia Pasific Metrology Program	2008–2013
15	Wakil Ketua Merangkap Anggota Tim Penilai Jabatan Fungsional Penyelidik Bumi dan Pengendali Dampak Lingkungan Badan Tenaga Nuklir Nasional	2008–2012
16	Anggota Komisi Standardisasi BATAN	2008, 2009, 2010, 2011
17	Delegasi RI dalam Radiation Safety Standards Committee (RASSC)-IAEA	2008–2010
18	Anggota Tim Penyusun Indikator Kinerja BATAN Tahun 2008	2008
19	Anggota Tim Penyusun Prioritas kegiatan BATAN Tahun 2009	2008
20	Anggota Tim Penyusun Review Rencana Strategik BATAN 2005-2009	2008
21	Equipment Officer. On-site Inspection Division, Preparatory Commission for the Comprehensive Nuclear Test-ban Treaty Organization (CTBTO)	1998–2007
22	Delegasi RI dalam International Committe on Radionuclide Metrology	1995–2021

G. Keikutsertaan dalam Kegiatan Ilmiah

No.	Tugas	Tahun
1	Koordinator kegiatan litbangjirap PSTA-BATAN:”Kajian Metode Kalibrasi Alat Ukur Radon untuk Percursor Kegempaan”:	2021
2	Koordinator kegiatan litbangjirap PSTA-BATAN:”Kajian Kebijakan Litbang Akselerator di Indonesia”	2020

No.	Tugas	Tahun
3	Koordinator kegiatan litbangjirap PSTA-BATAN:”Kajian Akselerator Berbasis Plasma”	2019
4	Anggota Program Insinas Riset Pratama Kemitraan, “Pengembangan Prototip Reaktor Produksi Isotop untuk Kedokteran Nuklir Berbasis Thorium Lokal”	2019
5	Anggota kegiatan litbangjirap PSTA-BATAN : “Penyempurnaan dan Revitalisasi Shielding Radiasi Fasilitas Uji in vitro dan in vivo Berbasis pada Beamport Tembus Radial Reaktor Kartini:	2018
6	Litbang Insinas Riset Pratama Konsorsium: “Pengembangan Teknologi Produksi Isotop Tc-99m untuk Diagnosis Medis di Bidang Kesehatan”	2018
7	Anggota Peneliti, Litbang Insinas Riset–Program PPTI-Konsorsium Pengembangan Teknologi dan Aplikasi BNCT (Boron Neutron Capture Therapy)	2018
8	Koordinator Kontrak Riset Kajian Potensi Identifikasi Molibdenum Berbasis Thorium Lokal. Kerma PT Timah dengan PSTA BATAN	2016
9	Anggota Peneliti Pengembangan Teknologi dan Aplikasi Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) dengan Compact Neutron Generator	2015– 2019
10	Manajer Puncak Sistem Manajemen Pranata Litbang Akselerator dan Proses Bahan PSTA BATAN (KNAPPP), Koordinator Para Penanggungjawab Litbang	2014– 2018
	Manajer Puncak Sistem Manajemen Mutu ISO 17025 Laboratorium Penguji PSTA-BATAN	2014– 2018
11	Manajer Puncak Sistem Manajemen Pranata Litbang Keselamatan Radiasi PTKMR-BATAN (KNAPPP), Koordinator Para Penanggungjawab Litbang	2010– 2013
12	Manajer Puncak Sistem Manajemen Mutu ISO 17025 Laboratorium Penguji dan Kalibrasi PTKMR-BATAN	2007– 2014

H. Keterlibatan dalam Pengelolaan Jurnal Ilmiah

No.	Tugas	Tahun
1	Anggota Editor Jurnal Ganendra–PSTA BATAN Yogyakarta	2018–2022
2	Anggota Editor Indonesian Journal of Physics and Nuclear Applications-UKSW Salatiga	2016–2022
3	Ketua Editor Jurnal Nuklir Indonesia-HIMNI Jakarta	1998
4	Anggota Dewan Redaksi Jurnal Ilmiah Inovasi Teknologi–Bina Insan Teknologi-Tangerang	1997

I. Karya Tulis Ilmiah

No.	Kualifikasi Penulis	Jumlah
1.	Kontributor Utama	46
2.	Kontributor Anggota	26
Total		72

No.	Kualifikasi Bahasa	Jumlah
1	Bahasa Inggris	41
2	Bahasa Indonesia	26
3	Bahasa Jepang	5
Total		72

J. Pembinaan Kader Ilmiah

No.	Nama Perguruan Tinggi	Tahun Mengajar
1	Universitas Nasional Jakarta	1996–1998 2016–sekarang

No.	Nama Perguruan Tinggi	Nama yang dibimbing	Tahun
1	Universitas Nasional Jakarta	Philip Emanuel Deo Setiawan (S-1)	2022
2	Universitas Nasional Jakarta	Boston Sihombing (S-1)	2022
3	Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Jati, Bandung	Isnaini Nur Islami (S-1)	2019
4	Universitas Islam Negeri Sunan Gunung Jati, Bandung	Rismayantina (S-1)	2019
5	Universitas Nasional Jakarta	Annisa Cita Rahmasiwi (S-1)	2018
6	Universitas Nasional Jakarta	Sita Purwajati (S-1)	2018
7	Universitas Nasional Jakarta	Gusti Randa Eka Putra (S-1)	2017
8	Universitas Nasional Jakarta	Khairullah (S-1)	2017

No.	Nama Diklat/ Penyelenggara	Tahun Mengajar
1	Penanggulangan Medik Kedaruratan Nuklir/ PTKMR BATAN	2011–2014
2	Pelatihan Kedaruratan Radiologik Bagi First Responder/Pusdiklat BATAN	2019
3	Nuclear School/Pusdiklat BATAN -IAEA	2018
4	Regional Workshop on Occupational Radiation Protection during High Exposure Operations/ PTKMR BATAN-IAEA	2017
5	OSI Experimental Advanced Course Related to the Comprehensive Nuclear-Test Ban Treaty/OSI- CTBTO	2001
6	Metode Deteksi Radiasi/ Pusdiklat BATAN-IAEA	1995

K. Organisasi Profesi Ilmiah

No.	Nama Organisasi	Jabatan	Tahun
1	Himpunan Periset Indonesia	Anggota	2022
2	Himpunan Peneliti Indonesia (Himpenindo)	anggota	2019
3	Himpunan Masyarakat Nuklir Indonesia (HIMNI)	Ketua Umum	2019
		Sekjen	2008–2014
			1995–1998
5	Asosiasi Peneliti Kesehatan Indonesia (APEKSI)	Anggota	2012
6	Atomic Energy Society of Japan (AESJ)	Anggota	1988–1995
7	The Physical Society of Japan (PSJ)	Anggota	1988–1993
8	Himpunan Fisika Indonesia (HFI)	Anggota	1982–1998
9	Perhimpunan Kedokteran dan Biologi Nuklir Indonesia (PKBNI)	Anggota	1993–1998
10	Asosiasi Proteksi Radiasi Indonesia (APRI)	Anggota	1981

L. Tanda Penghargaan

No.	Nama/Jenis Penghargaan	Pejabat/Instansi	Tahun
1	Experimental Originality Award	Atomic Energy Society of Japan (AESJ)	1992
2	Satya Lancana Karya Satya X	Presiden RI	1993
3	Satya Lancana Karya Satya XX	Presiden RI	2010
4	Satya Lancana Karya Satya XXX	Presiden RI	2011

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung BJ Habibie, Jl. M.H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.729



ISBN 978-623-8052-38-7



9 786238 105238 7

Buku ini tidak diperjualbelikan.