

BAB VI

Sistem Pemantauan Radiasi untuk Keamanan Nuklir

Kristedjo Kurnianto

A. Pendahuluan

Pemanfaatan teknologi nuklir merupakan sebuah isu yang kompleks dan interdisipliner karena selain potensi pemafaatan yang luar biasa, potensi bahaya yang mungkin ditimbulkan juga harus diperhatikan. Dalam setiap pemanfaatan teknologi nuklir, isu terkait keselamatan dan keamanan nuklir harus senantiasa diperhatikan karena melibatkan bahan nuklir, zat radioaktif, dan sumber radioaktif. Bahan nuklir dan zat radioaktif membutuhkan manajemen keselamatan dan keamanan yang baik. Zat radioaktif dan sumber radioaktif digunakan secara luas dalam dunia industri, kesehatan, pertanian, riset, dan pendidikan. Sementara itu, bahan nuklir biasanya digunakan pada instalasi nuklir maupun fasilitas nuklir terkait daur bahan bakar nuklir.

Kristedjo Kurnianto*

*Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), e-mail: kris004@brin.go.id

© 2023 Editor dan Penulis

Kurnianto, K. (2024). Sistem pemantauan radiasi untuk keamanan nuklir. Dalam Antariksawan, A. R. (Ed.), *Memperkuat Keamanan Nuklir Untuk Meningkatkan Pemanfaatan Iptek Nuklir* (123–147). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.760.c994, E-ISBN: 978-623-8372-75-1

Bahan nuklir, zat radioaktif, dan sumber radioaktif memiliki potensi bahaya karena radiasi yang dipancarkan. Oleh karena itu, bahan nuklir, zat radioaktif, maupun sumber radioaktif harus dikelola keselamatan dan keamanannya agar tidak menimbulkan bahaya bagi manusia maupun lingkungan akibat dari tindakan kejahatan, kecerobohan, atau ketidaktahuan dalam pengelolaannya. Jadi, perlindungan terhadap kehidupan manusia, kesehatan, dan lingkungan adalah tujuan utama dari langkah-langkah keselamatan dan keamanan nuklir.

Langkah-langkah keselamatan dan keamanan nuklir tersebut harus dirancang dan diimplementasikan secara terintegrasi serta memenuhi persyaratan keselamatan dan keamanan, baik dari aspek teknis maupun administratif, untuk menjamin keselamatan dan kesehatan manusia dan lingkungan. Terdapat berbagai faktor yang memastikan bahwa keselamatan dan keamanan bahan nuklir, zat radioaktif, dan sumber radioaktif telah terintegrasi dengan baik. Berbagai faktor tersebut, yaitu adanya komunikasi dari semua pemangku kepentingan terkait, keterlibatan ahli dalam pengambilan keputusan, diimplementasikannya budaya keselamatan dan keamanan, interdependensi di antara pemangku kepentingan dan tanggapan (atau respons) terhadap setiap kejadian keselamatan dan keamanan.

Langkah-langkah keselamatan dan keamanan nuklir memprioritaskan pencegahan sebelum langkah proteksi dan mitigasi. Sementara itu, dalam hal keamanan, di antara tindakan pencegahan yang diterapkan adalah tindakan deteksi (terhadap kemungkinan adanya sumber radiasi yang berasal dari bahan nuklir, zat radioaktif, atau sumber radioaktif). Salah satu tindakan pencegahan tersebut adalah penggunaan sistem pemantau (pendeteksi) serta pengukur radiasi yang terqualifikasi dan tepat sesuai tujuan penggunaannya. Selain itu, terkait penggunaan sistem pemantau dan pengukur radiasi tersebut, kesiapan sumber daya manusia yang memahami peralatan pengukur radiasi serta prosedur standar terkait sangat penting untuk diperhatikan. Keberadaan alat deteksi dan alat ukur radiasi ini sangat

penting untuk langkah keselamatan dan keamanan karena hakikatnya, radiasi tidak dapat dideteksi oleh panca indra manusia.

Bab ini akan menjelaskan secara garis besar tentang sistem pengukuran radiasi untuk keamanan nuklir dengan pembahasan yang dimulai dari kategorisasi zat radioaktif (untuk selanjutnya, digunakan zat radioaktif yang dapat mencakup bahan nuklir dan sumber radioaktif), ragam detektor radiasi, sistem pengukuran radiasi untuk keamanan dan implementasinya, serta perkembangan litbang pemantauan radiasi terkini. Pembahasan akan dibatasi dalam konteks fasilitas nuklir.

B. Bahan Nuklir dan Kategorisasi Zat Radioaktif

Sistem pengukuran radiasi sangat berkaitan dengan bahan nuklir atau zat radioaktif yang menjadi objek pengukuran dan akan menjadi dasar spesifikasi sistem pengukuran tersebut. Oleh karena itu, dalam subbab ini akan diuraikan mengenai bahan nuklir dan zat radioaktif serta kategorisasinya.

1. Bahan Nuklir

Bahan nuklir adalah bahan yang dapat menghasilkan reaksi pembelahan inti (fisi) berantai atau bahan yang dapat diubah menjadi bahan yang dapat menghasilkan reaksi pembelahan inti berantai, seperti U-233, U-235, dan Pu-239. Bahan nuklir digunakan, baik dalam industri nuklir maupun fasilitas riset nuklir, seperti pada instalasi daur bahan bakar nuklir (konversi, pengayaan, fabrikasi bahan bakar, serta pengolahan ulang bahan bakar nuklir), reaktor nuklir, perangkat kritis, serta fasilitas untuk menyimpan bahan bakar nuklir dan bahan bakar nuklir bekas. Keberadaan bahan nuklir tersebut secara ketat diawasi secara nasional oleh badan pengawas (di Indonesia adalah Badan Pengawas Tenaga Nuklir, BAPETEN), dan secara internasional oleh International Atomic Energy Agency (IAEA).

Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran mendefinisikan bahan nuklir menjadi tiga, yaitu bahan galian nuklir, bahan bakar nuklir, dan bahan ba-

kar nuklir bekas (UU No. 10, 1997). Bahan-bahan nuklir tersebut dikuasai oleh negara dan pemanfaatannya diatur dan diawasi oleh pemerintah. Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN)—saat ini telah tergabung dalam Badan Riset dan Inovasi Nasional, BRIN— ditunjuk oleh Pemerintah Republik Indonesia sebagai badan pelaksana ketenaganukliran di Indonesia, yang paling utama dalam mengelola bahan nuklir. BATAN/BRIN memiliki fasilitas nuklir seperti fasilitas eksplorasi dan eksploitasi bahan galian nuklir, fasilitas produksi bahan baku untuk pembuatan dan produksi bahan bakar nuklir, reaktor nuklir, pusat pengelolaan limbah nuklir dan radioaktif, yang semuanya digunakan untuk berbagai keperluan riset dan pelayanan kepada masyarakat.

2. Zat Radioaktif

IAEA (2011) dalam dokumen *Nuclear Security Recommendation on Radioactive Material and Associate Facilities* (IAEA NSS No. 14) membedakan antara zat radioaktif dan sumber radioaktif secara jelas. Zat radioaktif didefinisikan sebagai segala jenis bahan yang ditentukan oleh peraturan dan perundangan sebagai subjek yang diawasi dan dikendalikan karena sifat radioaktifitasnya. Sementara itu, sumber radioaktif adalah zat radioaktif berbentuk padat yang terbungkus secara permanen dalam kapsul yang terikat kuat serta tidak bisa dikecualikan dari kendali pengawasan. Sumber radioaktif juga mencakup material radioaktif yang terlepas dari sumber radioaktif yang bocor atau rusak (tidak termasuk bahan yang terbungkus untuk dilimbahkan atau bahan nuklir yang menjadi bagian dari daur bahan bakar reaktor nuklir). Dari definisi tersebut, jelas bahwa sumber radioaktif adalah subset dari zat radioaktif. Pengertian tentang zat radioaktif dan sumber radioaktif tersebut juga diadopsi oleh peraturan di Indonesia.

Sumber radioaktif dikategorikan menjadi 5 kategori berdasarkan tingkat bahaya pada kesehatan manusia, yang didasarkan pada perbandingan antara aktivitas (A) dan nilai D (A/D). Aktivitas A suatu sumber radioaktif diukur dalam tera becquerel (TBq). Nilai D adalah

aktivitas spesifik radionuklida (dalam TBq). Jika sejumlah nilai D zat radioaktif tersebut tidak dikendalikan, akan menyebabkan efek deterministik yang parah pada orang yang terpapar akibat paparan, baik eksternal dari sumber terbuka maupun internal dari zat radioaktif yang terdispersi (IAEA, 2005; IAEA, 2006). Sebagai contoh, nilai D untuk Cs-137 adalah 0,1 TBq. Kategori 1 menunjukkan yang paling berbahaya dan kategori 5 yang paling kurang berbahaya. Penjelasan lebih terperinci adalah sebagai berikut.

- 1) Kategori 1 ($A/D \geq 1000$)
Sumber radioaktif yang amat sangat berbahaya bagi manusia. Sumber radioaktif yang tidak ditangani atau terlindungi dengan aman, akan berakibat fatal/kematian jika individu terpapar dalam rentang beberapa menit sampai satu jam (eksternal). Selain itu, dapat menyebabkan kematian atau kerusakan permanen jika terdispersi (internal). Sebagai contoh, sumber radioaktif untuk iradiator dan terapi eksternal.
- 2) Kategori 2 ($1000 > A/D \geq 10$)
Sumber radioaktif yang sangat berbahaya bagi manusia. Sumber radioaktif yang tidak ditangani atau terlindungi dengan aman, dapat berakibat cedera permanen jika individu memegang atau memiliki kontak rentang menit–jam atau terpapar dalam rentang jam–hari (eksternal). Selain itu, dapat menyebabkan cedera permanen atau kematian jika masuk dalam tubuh (internal). Sebagai contoh, sumber radioaktif untuk radiografi industri dan radioterapi brakiterapi.
- 3) Kategori 3 ($10 > A/D \geq 1$)
Sumber radioaktif yang berbahaya bagi manusia. Sumber radioaktif yang tidak ditangani atau terlindungi dengan aman, mungkin berakibat cedera permanen, tetapi tidak sampai fatal jika individu memegang atau memiliki kontak beberapa jam atau terpapar dalam rentang hari–minggu (eksternal). Selain itu, mungkin tidak sampai menyebabkan cedera permanen atau kematian dalam waktu singkat jika terdispersi (internal). Sebagai contoh, sumber radioaktif untuk *gauging industry* aktivitas tinggi

(Cs-137, Co-60, dan Am241-Be rentang 0,4 MBq–40GBq), *well logging* dan fotofluorografi.

- 4) Kategori 4 ($1 > A/D \geq 0,01$)
Sumber radioaktif yang tidak berbahaya bagi manusia. Sumber radioaktif yang tidak ditangani atau terlindungi dengan aman, mungkin berakibat cedera sementara jika individu terpapar beberapa jam–minggu (eksternal) dan tidak sampai menyebabkan cedera permanen jika terdispersi (internal). Sebagai contoh, sumber radioaktif untuk *gauging industry* aktivitas rendah (Pm-147, Tl-204, Kr-85, Sr-90, dan Fe-55 dalam rentang aktivitas 0,4 MBq–40 GBq).
- 5) Kategori 5 ($A/D < 0,01$)
Sumber radioaktif yang paling tidak berbahaya bagi manusia, tidak sampai mencederai manusia (eksternal maupun internal). Sebagai contoh, sumber radioaktif untuk tujuan pendidikan dan litbang, *check-sources*, serta sumber radioaktif untuk kalibrasi dan standardisasi.

Kategori sumber radioaktif di atas menjadi dasar penentuan klasifikasi tingkat keamanan sumber radioaktif dalam pengangkutan, yaitu

- 1) sumber radioaktif kategori 3 harus memenuhi persyaratan tingkat keamanan dasar;
- 2) sumber radioaktif kategori 2 harus memenuhi persyaratan tingkat keamanan lanjutan; dan
- 3) sumber radioaktif kategori 1 harus memenuhi persyaratan tingkat keamanan lanjutan diperketat.

Penjelasan terkait tingkat kewanaman dapat ditemukan pada Bab 7 buku ini, terkait keamanan dalam pengangkutan zat radioaktif.

Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 6 Tahun 2015 tentang Keamanan Sumber Radioaktif (2015) menjelaskan upaya keamanan sumber radioaktif untuk berbagai kegiatan seperti ekspor, impor, penggunaan sumber radioaktif, produksi radioisotop, dan pengelolaan

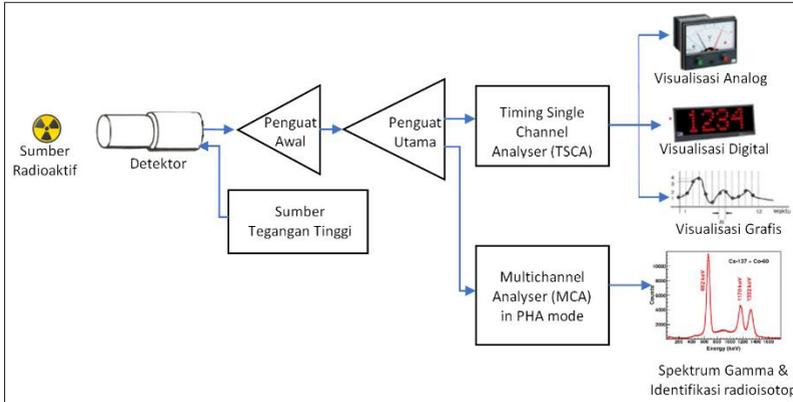
limbah yang harus memenuhi fungsi pencegahan, deteksi, penundaan, dan responss. Dari keempat fungsi tersebut, peran sistem pengukuran radiasi menjadi sangat penting terutama pada fungsi deteksi.

C. Ragam Detektor Radiasi

Tahapan terpenting dalam prosedur keamanan nuklir adalah mendeteksi (*detect*), menemukan (*locate*), dan mengidentifikasi (*identify*) suatu bahan atau benda-X (bahan atau benda yang tidak diketahui identitasnya) yang memancarkan radiasi nuklir. Fakta bahwa paparan radiasi dari bahan radioaktif tidak dapat dideteksi oleh panca indra manusia (diraba, dirasakan, dibaui, dilihat, dan didengar) maka diperlukan sistem deteksi dan pengukuran radiasi. Peralatan utama dalam sistem deteksi dan pengukuran radiasi adalah detektor, peralatan elektronik pemroses sinyal, dan penampil. Pada penampil dapat terlihat hasil pengukuran berupa cacah radiasi yang menunjukkan aktivitas sumber radiasi, sekaligus dapat membangkitkan alarm jika melampaui batas tertentu, ataupun spektrum radiasi yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi unsur sumber radiasi.

Fungsi dari masing-masing komponen sistem deteksi dan pengukuran radiasi tersebut adalah sebagai berikut (Gambar 6.1).

- 1) Detektor berfungsi untuk mengubah paparan radiasi menjadi pulsa listrik yang dapat diamati dan diukur.
- 2) Pemroses sinyal/pulsa listrik terdiri dari penguat awal (*pre-amplifier*), penguat utama (*amplifier*), penganalisis kanal tunggal berbasis waktu (*timing single channel analyser*, TSCA), atau penganalisis kanal jamak (*multi channel analyzer*, MCA). Pemroses pulsa berfungsi untuk mengolah pulsa keluaran dari detektor agar dapat disajikan dengan baik oleh peralatan penampil.
- 3) Peralatan penampil berfungsi untuk mengubah pulsa-pulsa listrik menjadi data analog, data digital, dan/atau divisualisasikan dalam bentuk grafis sehingga mudah dibaca, dianalisis, dan disimpulkan oleh pengguna.



Gambar 6.1 Blok Diagram Sistem Deteksi dan Pengukuran Radiasi

Sistem deteksi dan pengukuran radiasi dalam konteks keselamatan dan keamanan nuklir digunakan, baik untuk memberikan peringatan (berupa berbagai jenis alarm) maupun untuk mengukur dengan lebih teliti besaran radiasi yang ditimbulkan atau jenis sumber radiasi yang terkandung. Sistem deteksi yang memberikan peringatan umumnya dipasang secara permanen atau semipermanen seperti portal monitor radiasi (*radiation portal monitor*, RPM), *hand and foot monitor*, *stack monitor*, dan *area monitoring*. Sistem yang digunakan untuk mengukur radiasi dan mengidentifikasi sumber radioaktif umumnya dapat dijinjing (*portable*), seperti detektor radiasi personal (*personal radiation detector*, PRD), *surveymeter*, detektor pengidentifikasi radionuklida (*radionuclide identification detector*, RID), dan detektor radiasi ransel (*backpack radiation detector*, BRD). Perkembangan terbaru dalam sistem pengukuran radiasi jinjing adalah penggunaan wahana cangguh seperti *uncrewed aerial systems* (UASs) atau lebih sering dikenal sebagai *drone*, yang secara otomatis dapat mengamati suatu area tertentu dan menginterasikan dengan berbagai informasi geospasial sehingga memberikan peta sebaran sumber radioaktif secara lebih teliti. Beberapa peralatan tersebut dilihat pada Gambar 6.2.



Foto: Dokumentasi BATAN (2020)

Gambar 6.2 Beberapa Contoh Penggunaan Detektor *Portable* dan UAS

Sejalan dengan perkembangan era informasi digital, berbagai sistem deteksi dan pengukuran radiasi dilengkapi juga dengan kemampuan untuk berkomunikasi dengan komputer atau gawai melalui sambungan kabel maupun nirkabel. Berikut dijelaskan beberapa perangkat atau sistem deteksi radiasi yang umumnya digunakan di pintu gerbang berbagai fasilitas radiasi, instalasi nuklir, daerah perbatasan, lokasi keramaian yang penting, bandara, dan pelabuhan.

1. Detektor Radiasi Personal (PRD)

PRD adalah suatu alat elektronik untuk mendeteksi pengangkutan ilegal material radioaktif. Alat ini dirancang untuk dipakai petugas keamanan sebagai pemberi peringatan adanya peningkatan paparan radioaktif di atas paparan *background* (paparan radiasi alam). PRD sangat sensitif dan memiliki waktu responss yang cepat. Tingkat paparan radiasi yang terukur ditampilkan pada monitor (dalam

rontgen/R atau Sievert/Sv) dan memiliki alarm ambang batas paparan yang ditetapkan (dari peraturan yang berlaku).

Umumnya PRD menggunakan detektor NaI(Tl) atau CsI(Tl) untuk mendeteksi radiasi gamma. Beberapa PRD memiliki detektor tambahan, misalnya detektor Geiger-Mueller (GM) atau semikonduktor Si untuk tingkat paparan radiasi yang tinggi. Ada juga PRD lain yang ditambahkan pencacah proporsional atau sintilator berisi litium untuk mendeteksi adanya neutron.

Ada berbagai jenis dan merek detektor radiasi personel yang biasanya dipakai (ditempelkan pada bagian tubuh) oleh pekerja radiasi maupun petugas keamanan atau sering disebut sebagai *frontline officer* (FLO). PRD digunakan untuk mendeteksi secara dini dan menentukan lokasi sumber radioaktif buatan, baik berupa zat radioaktif maupun bahan nuklir.

2. Detektor Pengidentifikasi Radionuklida (RID)

RID atau juga sering disebut sebagai *radioisotope identification device* (RID) adalah instrumen jinjing yang digunakan untuk mendeteksi, menemukan/menentukan lokasi, mengukur, dan mengidentifikasi zat radioaktif dan bahan nuklir. Beberapa RID mampu mengidentifikasi jenis radioisotop pemancar radiasi serta mengklasifikasikannya sebagai bahan nuklir, zat radioaktif untuk keperluan industri, medis, atau zat radioaktif alam (*naturally-occurring radioactive material*, NORM).

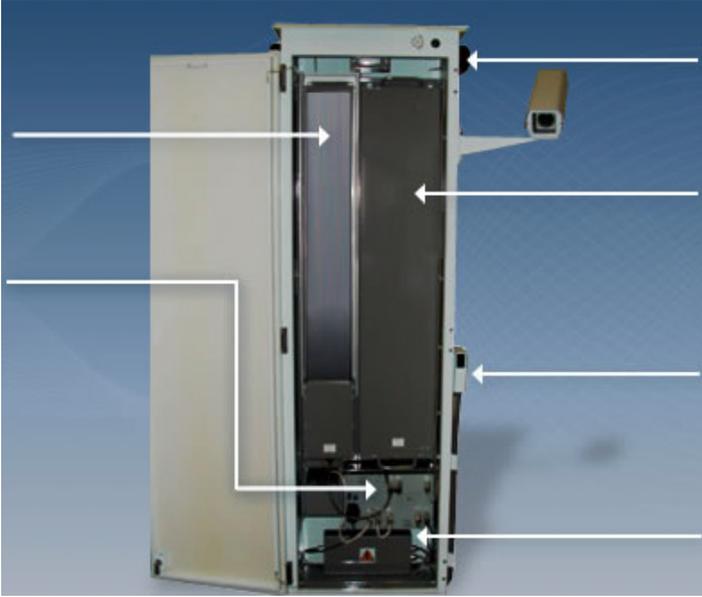
Ada berbagai jenis dan merek RID dengan rentang berbagai ketelitian dan jenis radiasi yang mampu dideteksi. Alat ini terdiri dari detektor NaI(Tl), basis data untuk mengidentifikasi jenis radionuklida, dan detektor GM untuk menentukan laju dosis pada lokasi tersebut.

RID merupakan suatu alat yang penting digunakan oleh petugas di perbatasan negara, bea cukai, dan aparat keamanan untuk melacak lokasi sumber radioaktif serta mengidentifikasi dengan lebih teliti jenis sumber radionuklida serta besaran paparan radiasinya. RID dapat dengan segera memberikan informasi adanya radiasi dan besaran paparan radiasi gamma atau neutron. Namun, dalam mode identifikasi, biasanya dibutuhkan waktu yang agak lama untuk dapat memberikan informasi jenis radionuklida yang terdeteksi.

3. Portal Monitor Radiasi (RPM)

RPM (lihat Gambar 6.3.) adalah portal monitor radiasi yang dipasang tetap untuk melakukan skrining atau pemeriksaan terhadap sumber radiasi gamma dan/atau neutron secara otomatis pada orang atau kendaraan yang melewati daerah deteksi, dengan tidak mengganggu objek yang dideteksi. RPM sangat diperlukan untuk dipasang di pintu keluar dan masuk perbatasan, pelabuhan laut, bandar udara, objek vital, serta fasilitas radiasi dan instalasi nuklir. RPM lebih sensitif daripada *handheld device* (PRD dan RID). Biasanya, RPM dioperasikan secara terus menerus. RPM juga dilengkapi dengan sensor hunian (*occupancy*) yang mendeteksi adanya objek yang berada di daerah deteksi dan membandingkan tingkat radiasi dengan tingkat alarm yang ditentukan berdasarkan cacah latar di daerah tersebut.

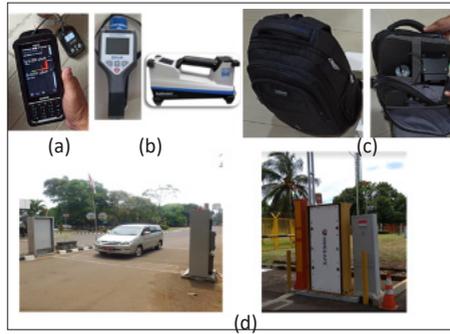
Menurut penggunaannya, ada beberapa jenis RPM ,seperti RPM pedestrian (pejalan kaki), RPM paket (misalnya *conveyor*), RPM kendaraan (termasuk peti kemas), dan RPM kereta api. RPM pedestrian merupakan sistem deteksi radiasi yang terpasang permanen atau semipermanen dan dirancang untuk memonitor secara otomatis personel atau pejalan kaki dengan barang-barang pribadi yang melewati zona deteksi. RPM kendaraan biasanya digunakan untuk menemukan keberadaan radiasi gamma dan neutron pada kendaraan besar. Secara umum, RPM akan memberi tahu petugas keamanan tentang keberadaan zat radioaktif dan/atau bahan nuklir serta memberikan informasi terkait alarm tambahan: jenis alarm (gamma, neutron, atau keduanya), besaran relatif alarm, dan lain-lain.



Sumber: IAEA (t.t.a)

Gambar 6.3 Konfigurasi Portal Monitor Radiasi

Beberapa contoh sistem deteksi dan pengukur radiasi yang digunakan untuk sistem pengamanan di Kawasan Nuklir Serpong dan Kawasan Nuklir Pasar Jumat diperlihatkan pada Gambar 6.4. Sementara itu, Tabel 6.1 menunjukkan fitur utama berbagai sistem deteksi dan penggunaannya.



Keterangan: (a) PRD, (b) RID, (c) BRD, dan (d) RPM
Foto: Dokumentasi BATAN (2020)

Gambar 6.4 Contoh Detektor Radiasi yang Digunakan di Kawasan Nuklir Serpong dan Kawasan Nuklir Pasar Jumat

Tabel 6.1 Fitur Berbagai Sistem Deteksi Radasi dan Pemanfaatannya

Jenis	Deteksi Gamma	Deteksi Neutron	Lokalisasi Gamma	Lokalisasi Neutron	Identifikasi Isotop	Alarm Keselamatan
RPM	ya	ya	sangat terbatas	sangat terbatas	tidak	tidak
PRD	ya	tidak	ya	tidak	tidak	ya
RID	ya	ya	ya	terbatas	ya	ya
BRD	ya	ya	ya	ya	ya	ya

D. Sistem Pengukuran Radiasi dan Implementasi untuk Keamanan

Ada beberapa faktor yang memengaruhi deteksi dan pengukuran radiasi yang harus diperhatikan oleh seluruh pengguna sistem pengukuran radiasi. Secara umum, faktor-faktor tersebut, antara lain, aktivitas dan energi sumber radioaktif, jarak sumber ke detektor, ada atau tidak adanya dinding (perisai), ketebalan perisai, bahan perisai (*shielding*), kecepatan gerak objek yang diamati (kendaraan atau pejalan kaki), *masking* dengan menggunakan NORM, dan alarm palsu akibat fluktuasi latar alam.

1. Prosedur FLO dalam Mendeteksi, Melokasi, dan Mengidentifikasi

Sebagai garda terdepan, implementasi pengukuran radiasi untuk keamanan dilakukan oleh *frontline officer* (FLO) yang bertugas mendeteksi dan mencegah penyelundupan zat radioaktif yang melintasi perbatasan atau *checkpoint* suatu fasilitas nuklir. Langkah pertama ialah mendeteksi (*detect*) keberadaan radiasi, dalam hal ini RPM dan PRD dapat digunakan untuk mendeteksi ada atau tidak adanya radiasi. Jika ditemukan kenaikan tingkat radiasi, langkah selanjutnya ialah melokasi (*locate*) sumber radioaktif tersebut. Untuk melakukan langkah ini, FLO dapat menggunakan RID dalam mode pencarian (*search mode*). Jika sudah ditemukan bagian atau lokasi terbesar radiasi, langkah selanjutnya ialah melakukan identifikasi (*identify*) dengan menggunakan RID. Fungsi ini membutuhkan beberapa saat sampai RID menampilkan jenis isotop dan kategori material yang terdeteksi. Gambar 6.5 mengilustrasikan langkah-langkah deteksi, lokalisasi, dan identifikasi zat radioaktif.



Dalam praktik pemeriksaan kendaraan di suatu fasilitas nuklir, setiap alarm harus ditindaklanjuti meskipun terkadang bisa muncul alarm palsu yang harus diinvestigasi lebih lanjut. Berikut dijelaskan langkah-langkah proses responss terhadap alarm, yaitu: deteksi radiasi, verifikasi, pemisahan, skrining, lokalisasi, identifikasi, dan pengambilan keputusan. Masing-masing langkah diperinci sebagai berikut.

- 1) Deteksi radiasi, ditengarai dengan adanya peningkatan tingkat radiasi dan munculnya alarm dari RPM atau PRD.
- 2) Verifikasi, perlu dilakukan untuk memastikan alarm itu muncul sebagai alarm yang sebenarnya, bukan alarm palsu (*false alarm*) akibat *statistical error*.
- 3) Pemisahan (*separation*), harus dilakukan dengan menghentikan dan memisahkan kendaraan dari antrian agar tidak mengganggu proses pengecekan kendaraan selanjutnya.
- 4) Skrining, dilakukan untuk mengukur besaran paparan radiasi ($\mu\text{Sv}/\text{jam}$) dan memastikan masih dalam batas yang tidak membahayakan manusia. Hal penting yang harus diperhatikan adalah jika ditemukan 3 tingkat bahaya bagi manusia, yaitu paparan radiasi melebihi $100 \mu\text{Sv}/\text{jam}$ pada jarak 1 m dari objek, adanya radiasi neutron, dan ditemukannya kebocoran (*leakage*) cairan atau serbuk terkontaminasi yang bisa menyebabkan bahaya internal.
- 5) Lokalisasi, dilakukan dengan menggunakan RID sampai menemukan lokasi tertentu sumber radioaktif, sambil tetap terus memperhatikan keselamatan FLO sendiri.
- 6) Identifikasi, penentuan isotop dan kategori sumber radioaktif dilakukan dengan saksama pada lokasi sumber yang sudah ditemukan sebelumnya.
- 7) Pengambilan keputusan, langkah terakhir, tergantung dari hasil identifikasi dengan mengacu pada peraturan yang berlaku.

Dalam meresponss alarm yang muncul dari sistem deteksi dan pengukuran radiasi, perlu diperhatikan hal-hal sebagai berikut (Gambar 6.6).

- 1) Jika ditemukan tingkat radiasi yang membahayakan manusia, perlu segera melakukan prosedur keselamatan, mengisolasi sumber, memberi tanda bahaya, dan melaporkan ke pihak berwajib atau otoritas yang lebih tinggi, yang selanjutnya akan ditindaklanjuti dengan tanggap darurat oleh otoritas terkait.

- 2) Jika ditemukan tingkat radiasi yang tidak membahayakan manusia, langkah lokalisasi dan identifikasi dilakukan. Hasil identifikasi akan ditentukan apakah bahan tersebut dicurigai sebagai sumber selundupan (*suspect illicit source*). Selanjutnya, dilakukan langkah notifikasi sesuai protokol tanggapan kepada otoritas terkait. Jika alarm yang timbul berasal dari sumber yang tidak berbahaya (*innocent source*), akan dilakukan pelepasan (*release*). Alarm yang tidak berbahaya adalah alarm radiasi yang disebabkan oleh zat radioaktif yang tidak dimaksudkan untuk digunakan dalam tindak kejahatan (*malicious act*). Alarm yang tidak berbahaya dapat muncul pada orang yang baru saja mendapatkan perlakuan medis menggunakan isotop, kargo berisi zat radioaktif yang ada di alam (NORM), atau pengangkutan bahan radioaktif legal yang dilengkapi dokumen yang sesuai. Ada beberapa bahan yang mengandung zat radioaktif yang dapat menyebabkan alarm yang tidak berbahaya. Dalam hal ini bisa berupa batu alam, pupuk, keramik, batang las, kaca hijau uranium, layar video, peralatan seperti pengukur kelembaban, atau *tailing* dari industri minyak atau instalasi desalinasi.



Keterangan: (a) Ilustrasi langkah deteksi, lokasi, dan identifikasi dan (b) ilustrasi lengkapnya
 Sumber: Adaptasi dari IAEA (t.t.a)

Gambar 6.6 Hal-hal yang perlu diperhatikan dalam merespons alarm yang muncul dari sistem deteksi dan pengukuran radiasi.

Untuk memudahkan pekerjaan FLO, IAEA telah meluncurkan sebuah aplikasi TRACE (Tool for Radiation Alarm and Commodity Evaluation) yang dapat dipasang pada berbagai gawai berbasis macOS maupun Android (Dahlstrom, 2017) (Gambar 6.7). Aplikasi ini dapat diunduh secara gratis dan menyediakan basis data (*database*) material yang mengandung radionuklida yang berasal dari alam dan dapat menginisiasi alarm yang tidak berbahaya. Basis data material ini juga dilengkapi dengan HS Code (*Harmonized System Code*) yang biasanya tercantum dalam dokumen ekspor-impor. Aplikasi ini juga dilengkapi sistem pencatatan alarm dan basis data berbagai jenis RPM komersial.

Buku ini tidak diperjualbelikan



(a)

(b)

Sumber: (a) Dahlstrom (2017); (b) Kristedjo Kurnianto (2024)

Gambar 6.7 Ilustrasi Penggunaan Aplikasi TRACE pada Telepon Genggam

2. Standardisasi

Sistem pengukuran radiasi yang digunakan, baik di dalam maupun di luar ruangan, harus memenuhi persyaratan keakuratan pengukuran radiasi dan ketahanan fisik terhadap lingkungan penggunaannya. Sistem pengukuran radiasi harus memiliki kekuatan terhadap benturan, temperatur lingkungan, kelembaban udara, gangguan gelombang elektromagnetik, debu, percikan air, getaran, dan sumber gangguan dari lingkungan lainnya. Oleh karena itu, sebelum menggunakan peralatan ini, harus dipastikan sertifikat kalibrasi dan keberterimaan dengan standar yang berlaku. Tabel 6.2 menampilkan standar yang berlaku pada instrumen untuk deteksi penyelundupan zat radioaktif (*illicit trafficking*).

Tabel 6.2 Daftar Standar untuk Berbagai Instrumen Deteksi Penyelundupan

Jenis Instrumen	Nomor IEC	Judul Standar
Dikenakan Tubuh	62401	Radiation protection instrumentation – Alarming Personal Radiation Devices (PRDs) for the detection of illicit trafficking of radioactive material
	62618	Radiation protection instrumentation – Spectroscopy-Based Alarming Personal Radiation Devices (SPRD) for detection of illicit trafficking of radioactive material

Jenis Instrumen	Nomor IEC	Judul Standar
	62694	Radiation protection instrumentation – Backpack-type radiation detector (BRD) for detection of illicit trafficking of radioactive material
Jinjing atau Hand-held	62327	Radiation protection instrumentation – Hand-held instruments for the detection and identification of radionuclides and for the estimation of ambient dose equivalent rate from photon radiation
	62533	Radiation protection instrumentation – Highly sensitive hand-held instruments for photon detection of radioactive material
	62534	Radiation protection instrumentation – Highly sensitive hand-held instruments for neutron detection of radioactive material
Portal	62244*)	Radiation protection instrumentation – Installed radiation portal monitors (RPMs) for the detection of illicit trafficking of radioactive and nuclear materials
	62484	Radiation protection instrumentation – Spectroscopy-based portal monitors used for the detection and identification of illicit trafficking of radioactive material
Format Data	61755	Radiation protection instrumentation – Data format for radiation instruments used in the detection of illicit trafficking of radioactive materials

Keterangan: *)Sudah diadopsi menjadi SNI IEC 62244 : 2016 “Instrumentasi proteksi radiasi–Monitor radiasi yang terpasang untuk deteksi bahan nuklir khusus dan radioaktif di perbatasan wilayah”

Sumber: International Electrotechnical Commission (2017a, 2017b, 2020, 2022)

E. Perkembangan Penelitian dan Pengembangan Sistem Pemantauan Radiasi

BATAN, yang saat ini sudah terintegrasi menjadi BRIN, sebagai lembaga penelitian dan pengembangan terkait pemanfaatan teknologi nuklir memiliki peranan penting dalam menghasilkan dan meningkatkan produk inovasi, khususnya terkait teknologi nuklir yang berdaya saing dan investasi berbiaya rendah. Pusat Rekayasa

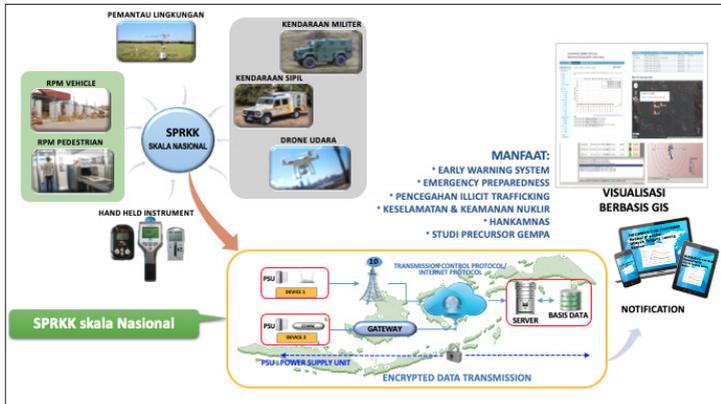
Fasilitas Nuklir (PRFN) yang saat ini terintegrasi dalam Pusat Riset Teknologi Deteksi Radiasi dan Analisis Nuklir (PRTDRAN) telah dan sedang mengembangkan monitor lingkungan, *smart surveymeter*, dan perangkat portal monitor radiasi (RPM) sebagai bagian dari sistem pemantauan radiasi lingkungan untuk keselamatan dan keamanan (SPRKK).

SPRKK merupakan sebuah sistem deteksi radiasi terintegrasi secara nasional dengan menekankan peningkatan kandungan lokal (tingkat komponen dalam negeri, TKDN) dengan tiga capaian besar yang akan diwujudkan, yaitu (Gambar 6.8)

- 1) sistem informasi pemantauan radiasi lingkungan skala nasional;
- 2) perangkat pengukur radiasi laik industri; serta
- 3) standar, sertifikasi, dan kebijakan pendukung lainnya.

Saat ini, Indonesia baru memiliki beberapa RPM dan merupakan produk impor. Oleh karena itu, perawatan dan penggantian suku cadang masih bergantung kepada produsen RPM tersebut, serta menimbulkan tanda tanya terkait jaminan keamanan data hasil pemantauannya. Sejalan dengan upaya untuk mengatasi hal tersebut, salah satu produk kegiatan pengembangan SPRKK yang sudah mencapai kemajuan signifikan adalah pengembangan RPM kendaraan hasil kolaborasi BATAN dengan pihak regulator (BAPETEN), universitas (UGM), dan industri nasional (PT LEN).

RPM hasil pengembangan tersebut sudah melalui berbagai jenis uji, sesuai yang dipersyaratkan dalam SNI IEC 62244: 2016 “Instrumen-tasi proteksi radiasi–Monitor radiasi yang terpasang untuk deteksi bahan nuklir khusus dan radioaktif di perbatasan wilayah”. Gambar 6.9 memperlihatkan foto-foto sebagian proses pengujian radiologi dan non radiologi yang sudah dilakukan di berbagai laboratorium terkait.



Ilustrasi: Dokumentasi BATAN (2020)

Gambar 6.8 Info Grafis Kegiatan Prioritas Riset Nasional SPRKK



Keterangan: (a) uji radiologi statis dan dinamis; (b) uji temperatur dan kelembaban lingkungan, uji dampak, uji getas, ketahanan terhadap air
Foto: Dokumentasi BATAN (2020)

Gambar 6.9 Proses pengujian radiologi dan non radiologi yang sudah dilakukan di berbagai laboratorium di BATAN (BRIN).

Saat ini, RPM hasil pengembangan BATAN sudah dipasang dan dioperasikan untuk memastikan keamanan Kawasan Nuklir Serpong dan Kawasan Nuklir Pasar Jumat. Diharapkan, pada akhir tahun 2024 seluruh fasilitas nuklir BRIN lainnya (di Bandung dan Yogyakarta) dapat dilengkapai dengan RPM kendaraan hasil pengembangan sendiri. Di samping itu, RPM jenis pedestrian juga dikembangkan dan mulai dioperasikan di Kawasan Nuklir Serpong. Dalam rencana jangka panjang, dengan kerjasama industri nasional, diharapkan kebutuhan RPM di pelabuhan, bandara, dan lintas batas negara dapat dipenuhi oleh RPM produk dalam negeri. Dengan demikian, Indonesia dapat memenuhi kebutuhan pemantauan lalu lintas zat radioaktif guna meningkatkan keselamatan bahaya radiasi dan keamanan penyalahgunaan bahan radioaktif menggunakan RPM produksi dalam negeri berbiaya rendah dari segi produksi, operasional, perawatan, dan kalibrasi.

Sejalan dengan pengembangan RPM, saat ini juga sedang dikembangkan perangkat *smart surveymeter* (sejenis RID), *drone* pengukur radiasi (UAS), monitor lingkungan, dan kendaraan monitor radiasi yang seluruhnya akan terintegrasi dalam sebuah sistem informasi yang dapat dipantau secara terpusat. Dengan integrasi data dan pengelolaan data terpusat, ketersediaan data dan riwayat data dapat digunakan untuk berbagai kepentingan seperti big data. Pada saatnya, data-data tersebut dapat dimanfaatkan untuk *information mining*, *machine learning*, *predictive model*, dan berbagai aplikasi analisis tingkat lanjut yang saat ini banyak dimanfaatkan untuk keperluan riset, keamanan dan keselamatan fasilitas nuklir, serta masyarakat pada umumnya.

F. Penutup

Pembangunan kapasitas bidang pemantauan dan pengukuran radiasi sangat penting bagi Indonesia. Penguasaan teknologi pengukuran radiasi adalah suatu keniscayaan yang harus terus diupayakan untuk menjamin keselamatan dan keamanan masyarakat yang saat ini sudah banyak memanfaatkan aplikasi teknologi nuklir pada berbagai bidang.

Sistem deteksi radiasi modern saat ini mengintegrasikan sejumlah besar detektor tetap dan bergerak (*mobile*) yang digunakan untuk keperluan keselamatan dan keamanan fasilitas nuklir, aplikasi medis, pengangkutan material nuklir, pos pemeriksaan perbatasan, pelabuhan laut, bandara, serta pusat keramaian lainnya. Di sisi lain, perkembangan teknologi pada era informasi harus diantisipasi dengan berbagai penyesuaian dan penguasaan teknologi elektronika nuklir maju dan sistem kendali terintegrasi. Penggunaan *smart detector* yang dilengkapi dengan kemampuan terhubung pada jaringan melalui kabel maupun nirkabel juga memunculkan suatu tantangan baru dalam bidang keamanan data dan keamanan siber sehingga konsep kerahasiaan, integritas, dan ketersediaan data dapat terjamin. Penyesuaian terhadap perkembangan teknologi deteksi dengan perubahan ancaman terhadap keamanan nuklir juga perlu diantisipasi dengan pemanfaatan *big data* untuk *information mining*, penggunaan kecerdasan buatan, dan analisis tingkat lanjut, baik untuk keperluan riset maupun peningkatan unjuk kerja sistem keamanan nuklir itu sendiri.

Peran peningkatan kemampuan sumber daya manusia dan keterlibatan pemangku kepentingan terkait pengguna dan pengawas sangat dibutuhkan untuk menjamin keamanan fasilitas nuklir juga fasilitas lainnya. Penyusunan peta jalan keamanan nuklir yang terintegrasi hasil kolaborasi pemangku kepentingan terkait, seperti BRIN, BAPETEN, kepolisian, dan beberapa lembaga strategis seperti Badan Intelijen Negara (BIN), perguruan tinggi, kalangan industri, serta pengguna lainnya perlu segera dibuat dan diupayakan implementasinya. Dari sisi teknologi sistem keamanan, termasuk sistem pemantau radiasi, peran BRIN sangat penting untuk menghasilkan inovasi sehingga dapat melepas ketergantungan dengan peralatan impor, yang pada akhirnya akan memperkuat keamanan nuklir di Indonesia.

Daftar Referensi

- International Atomic Energy Agency. (2005). Categorization of radioactive sources. *IAEA Safety Standard Series No. RS-G-1.9*. <https://www.iaea.org/publications/7237/categorization-of-radioactive-sources>
- International Atomic Energy Agency. (2006). Dangerous quantities of radioactive material (D-values). *Emergency Preparedness and Responssse*. <https://www.iaea.org/publications/7568/dangerous-quantities-of-radioactive-material-d-values>
- International Atomic Energy Agency. (2007a). Identification of radioactive sources and devices. *IAEA Nuclear Security Series No. 5*. <https://www.iaea.org/publications/7567/identification-of-radioactive-sources-and-devices>
- International Atomic Energy Agency. (2007b). Combating illicit trafficking in nuclear and other radioactive material. *IAEA Nuclear Security Series No. 6*. <https://www.iaea.org/publications/7806/combating-illicit-trafficking-in-nuclear-and-other-radioactive-material>
- International Atomic Energy Agency. (2009). Security of radioactive sources. *IAEA Nuclear Security Series No. 11*. <https://www.iaea.org/publications/8113/security-of-radioactive-sources>
- International Atomic Energy Agency. (2011). Nuclear security recommendations on radioactive material and associated facilities. *IAEA Nuclear Security Series No. 14*. <https://www.iaea.org/publications/8616/nuclear-security-recommendations-on-radioactive-material-and-associated-facilities>
- International Atomic Energy Agency. (t.t.a). Radiation detection techniques for nuclear security applications (E-learning). *Cyber Learning Platform for Network Education and Training (CLP4NET)*. Diakses pada Agustus 2022, dari <https://elearning.iaea.org/m2/mod/scorm/view.php?id=5647>
- Dahlstrom, D. (2017, 9 Juni). IAEA launches mobile application tool for radiation alarm and commodity evaluation. *International Atomic Energy Agency*. <https://www.iaea.org/newscenter/news/iaea-launches-mobile-application-tool-for-radiation-alarm-and-commodity-evaluation>
- International Electrotechnical Commission. (2017a). Radiation protection instrumentation-Hand-held instruments for the detection and identification of radionuclides and for the indication of ambient dose-equivalent rate from photon radiation. International Standard CEI IEC 62327. <https://webstore.iec.ch/publication/31971>

- International Electrotechnical Commission. (2017b). Radiation protection instrumentation-Alarming personal radiation devices (PRD) for detection of illicit trafficking of radioactive material. International Standard IEC 62401. <https://webstore.iec.ch/publication/27563>
- International Electrotechnical Commission. (2020). Radiation protection instrumentation - Spectrometric radiation portal monitors (SRPMs) used for the detection and identification of illicit trafficking of radioactive material. International Standard IEC 62484. <https://webstore.iec.ch/publication/62650>
- International Electrotechnical Commission. (2022). Radiation protection instrumentation-Spectroscopy-based alarming personal radiation detectors (SPRD) for detection of illicit trafficking of radioactive material. International Standard IEC 62618. <https://webstore.iec.ch/publication/66065>
- Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 6 Tahun 2015 tentang Keamanan Sumber Radioaktif. (2015). <https://jdih.bapeten.go.id/id/dokumen/peraturan/peraturan-kepala-badan-no-6-tahun-2015-tahun-2015-tentang-keamanan-sumber-radioaktif>
- Undang-undang Republik Indonesia Nomor 10 tahun 1997 tentang Ketenaganukliran. (1997). <https://jdih.bapeten.go.id/id/dokumen/peraturan/undang-undang-republik-indonesia-nomor-10-tahun-1997-tentang-ketenaganukliran>