

Peran Forensik Nuklir dalam Keamanan Nuklir

Jan Setiawan, Dwi Agus Wrihatno, & Agus Sumaryanto

A. Pendahuluan

Berdasarkan data dari International Atomic Energy Agency (IAEA), di tahun 2021 telah dilaporkan 120 kejadian terkait penyalahgunaan bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya yang didaftarkan dalam *incident and trafficking database* (ITDB) oleh 32 negara (IAEA, 2022). Dalam ITDB, kejadian yang melibatkan bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya dibagi menjadi tiga kelompok, yaitu

- 1) kelompok I, untuk kejadian yang merupakan, atau yang terkait dengan penyelundupan atau penyalahgunaan;
- 2) kelompok II, untuk kejadian dengan maksud yang tidak bisa ditentukan; dan
- 3) kelompok III, untuk kejadian yang bukan, atau tidak terkait dengan penyelundupan atau penyalahgunaan.

Jan Setiawan*, Dwi Agus Wrihatno, & Agus Sumaryanto

* Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), e-mail: jans002@brin.go.id

© 2023 Editor dan Penulis

Setiawan, J., Wrihatno, D. A., & Sumaryanto, A. (2024). Peran forensik nuklir dalam keamanan nuklir. Dalam Antariksawan, A. R. (Ed.), *Memperkuat Keamanan Nuklir Untuk Meningkatkan Pemanfaatan Iptek Nuklir* (99–121). Penerbit BRIN. DOI: 10.55981/brin.760.c993, E-ISBN: 978-623-8372-75-1

Dari tahun 1993 hingga 2021, telah terjadi kejadian yang dilaporkan sebanyak 3.928 kejadian, dengan 320 kejadian untuk kelompok I, 1.034 kejadian untuk kelompok II, dan terbanyak pada kelompok III yang dilaporkan sebanyak 2.574 kejadian. Beberapa tahun terakhir, telah terjadi peningkatan kejadian terkait pendeteksian pada barang produksi untuk rumah tangga yang terkontaminasi dengan zat radioaktif. Hal ini menunjukkan adanya masalah yang belum terselesaikan di sebagian negara dalam mengamankan dan mendeteksi pembuangan sumber radioaktif yang tidak berizin. Sumber yang paling umum menyebabkan kontaminasi adalah bahan umpan (berupa logam) untuk memproduksi barang rumah tangga tersebut. Sebagian besar bahan umpan diperoleh dari industri daur ulang logam. Dalam prosesnya, dilakukan peleburan dan terjadi kontaminasi dari sumber radioaktif yang tidak terdeteksi, seperti kobalt-60. Kejadian ini menghasilkan logam yang terkontaminasi dan apabila digunakan untuk memproduksi peralatan rumah tangga akan sangat berpotensi mengganggu kesehatan penggunaannya.

Indonesia merupakan negara kepulauan yang sangat strategis, dilalui jalur lalu lintas perdagangan dunia. Sebagai negara kepulauan, lalu lintas perdagangan secara nasional banyak melalui jalur laut. Indonesia memiliki akses yang terbuka lebar untuk keluar masuk perdagangan internasional melalui pelabuhan. Tidak semua pelabuhan di Indonesia memiliki perangkat *radiation portal monitor* (RPM) untuk memantau bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya. Kondisi ini merupakan salah satu ancaman sistem keamanan nuklir di Indonesia yang menjadi sumber terjadinya penyelundupan bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya. Perlu dipahami, kegagalan sistem keamanan nuklir tidak hanya disebabkan dari dalam negeri, tapi juga sangat memungkinkan berasal dari luar negeri yang memiliki dampak bagi Indonesia. Peristiwa yang melibatkan bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya selalu mendapat perhatian masyarakat internasional, terutama dampak radiologinya bagi makhluk hidup dan lingkungan (Apikyan & Diamond, 2015). Untuk peristiwa keamanan nuklir, tugas pihak berwenang—dalam hal ini Kepolisian Republik Indonesia (Polri) dan

Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN)—setelah mendeteksi dan mengamankan bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya, perlu menguak dan memberi jawaban mengenai asal bahan, pelaku, motif atau tujuan penyalahgunaannya, serta bahaya radiologi yang ditimbulkan. Dari temuan ini tentunya dapat membawa pelaku ke pengadilan untuk mempertanggungjawabkan tindakannya.

B. Kebijakan dan Praktik Forensik Nuklir

Bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya lazim digunakan di seluruh siklus bahan bakar nuklir dan juga banyak digunakan di industri, penelitian, studi medis dan biologi, serta aplikasi teknis dan ilmiah lainnya. Penerapan infrastruktur keamanan nuklir untuk melindungi bahan-bahan ini, termasuk tindakan yang dirancang untuk mencegah, mendeteksi, dan menanggapi peristiwa keamanan nuklir merupakan tanggung jawab negara. Ketika bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya terdeteksi di luar kendali peraturan (*out of regulatory control*), negara harus siap untuk meresponss dengan tepat, termasuk menerapkan forensik nuklir untuk mendukung penyelidikan. Beberapa contoh bahan nuklir dan zat radioaktif (radionuklida) lainnya ditunjukkan pada Tabel 5.1.

IAEA sebagai badan energi nuklir dunia memiliki basis data mengenai insiden dan penyelundupan terkait bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya, di mana kepemilikannya di luar kendali peraturan, dicuri atau hilang, atau aktivitas lainnya yang di luar kendali peraturan. Informasi tersebut merupakan hasil pelaporan secara sukarela oleh negara. Suatu insiden sangat mungkin berupa satu jenis atau kombinasi kejadian yang disebutkan, misalnya pencurian dan percobaan penjualan sumber radioaktif. Meskipun suatu negara telah memiliki infrastruktur keamanan nuklir nasional, potensi terjadi insiden yang melibatkan bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya yang di luar kendali masih sangat memungkinkan, baik tidak sengaja maupun disengaja. Oleh karena itu, negara perlu mengembangkan kemampuan untuk mencegah, mendeteksi, dan menanggapi setiap peristiwa yang melibatkan bahan nuklir atau zat radioaktif lainnya yang memiliki

implikasi keamanan nuklir (peristiwa keamanan nuklir). Dalam konteks ini, pemeriksaan forensik nuklir menjadi komponen penting dari responss terhadap peristiwa keamanan nuklir. Sebagai bagian dari ilmu forensik pada umumnya, forensik nuklir adalah pengujian bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya, atau suatu barang bukti yang terkontaminasi oleh radionuklida, dalam konteks proses hukum di bawah hukum nasional atau internasional yang menyangkut dengan keamanan nuklir (IAEA, 2015).

Tabel 5.1 Contoh Bahan Nuklir dan Zat Radioaktif Lainnya

Jenis Bahan	Contoh
Bahan nuklir	Pu, U-233, U-235, U-238
Radionuklida medis	C-14, Co-57, Ga-67, I-123, I-125, I-131, Tc-99m, Tl-201
Radionuklida industri	Am-241, Ba-133, Cd-109, Cf-252, Co-60, Cs-137, Ir-192, Sr-90

Sumber: IAEA (2015)

Dari penyelidikan peristiwa keamanan nuklir, dapat diambil pembelajaran yang dimasukkan ke dalam langkah-langkah keamanan nuklir, guna meningkatkan dan membantu pencegahan peristiwa keamanan nuklir di masa depan. Sebagai contoh, temuan forensik nuklir menyatakan bahwa bahan telah mengalami pemindahan dari fasilitas atau situs yang sebelumnya dianggap aman. Kekurangan dari akuntansi bahan nuklir dan sistem keamanan nuklir dapat diidentifikasi, baik di tingkat fasilitas maupun negara. Kemampuan forensik nuklir yang dimiliki oleh suatu negara juga dapat mencegah kelompok yang bermaksud menggunakan atau memperdagangkan bahan nuklir atau zat radioaktif lainnya secara tidak sah (*deterrence effect*). Keberhasilan forensik nuklir dalam mencegah sangat bergantung pada implementasinya yang kredibel, menunjukkan keberhasilan dalam mendukung penyelidikan, dan keberhasilan proses hukum yang bergantung pada temuan forensik nuklir.

Buku ini tidak diperjualbelikan

Investigasi forensik nuklir harus dipertimbangkan sebagai bagian dari serangkaian tindakan komprehensif untuk deteksi, intersepsi, kategorisasi, dan karakterisasi bahan nuklir. Analisis forensik nuklir dapat menghasilkan kesimpulan penting tentang asal bahan. Dengan demikian, forensik nuklir memberikan kontribusi paling penting untuk pencegahan kejadian berulang di masa depan dari sumber yang sama. Oleh karena itu, penting untuk memastikan seluruh proses integritas dan keaslian bukti yang dikumpulkan. Proses ini membutuhkan kolaborasi berbagai aktor di tempat kejadian, seperti penegak hukum, layanan proteksi radiasi, ahli forensik, dan ahli nuklir. Kelompok kerja internasional untuk penyelundupan bahan nuklir, International Technical Working Group (ITWG), telah mengembangkan model rencana aksi untuk menangani kasus yang melibatkan penyitaan bahan nuklir. Rencana aksi ini menjabarkan elemen-elemen yang diperlukan jika bahan nuklir terlarang ditemukan, seperti respons terhadap insiden, analisis tempat kejadian perkara (TKP), pengumpulan bukti, pengangkutan ke fasilitas nuklir, analisis laboratorium selanjutnya, dan pengembangan kasus.

Sifat peluruhan radioaktif dari bahan nuklir dan zat radioaktif digunakan untuk mengumpulkan informasi yang tidak selalu tersedia dalam forensik konvensional. Peluruhan juga dapat menimbulkan kekhawatiran khusus karena sistem sampel dapat berubah dengan cepat dan tidak dapat dikarakterisasi dengan baik seperti yang diinginkan. Oleh karena itu, pengetahuan menyeluruh tentang beberapa konsep dan pemikiran khusus sangat diperlukan untuk melakukan investigasi forensik nuklir. Penentuan usia bahan nuklir merupakan teknik yang penting dalam penyelidikan forensik nuklir. Teknik penanggalan dapat digunakan untuk mengidentifikasi sumber bahan serta prosedur yang mungkin telah dilakukan pada bahan tersebut, seperti pemrosesan ulang (Mayer, Wallenius, & Fanghänel, 2007). Informasi dari umur bahan dapat digunakan untuk mengidentifikasi atau mengecualikan suatu bahan tertentu dalam 'daur' materi yang diamati (Mayer et al., 2011). Teknik atau analisis penentuan umur suatu bahan dikenal dengan kronometri. Nuklida yang melalui

peluruhan radioaktif (misalnya ^{234}U dan ^{230}Th) akan memiliki konsentrasi relatif yang dapat diprediksi dengan mudah menggunakan persamaan pertumbuhan dan waktu paro yang relevan. Pada bahan yang telah dimurnikan secara radiokimia untuk menghilangkan spesies luruhan, waktu yang telah berlalu sejak pemurnian sering kali dapat 'dihitung kembali' menggunakan teknik pemisahan radiokimia yang berhubungan dengan pengukuran analitik dari rasio induk-anak yang ada. Aplikasi khusus kronometri juga dapat digunakan dalam analisis sampel unik. Konsep kronometri mewujudkan satu terobosan untuk sepenuhnya mengkarakterisasi bahan nuklir: komposisi bahan nuklir berubah saat sampel disiapkan dan dianalisis. Pertimbangan ini menjadi penting untuk spesies yang meluruh dengan cepat dan/atau yang produk turunannya menimbulkan interferensi spektral. Peluruhan pada sampel bahan nuklir mendorong pengembangan metode analisis yang cepat. Pengembangan analisis yang cepat tidak hanya berpotensi menyederhanakan data yang dihasilkan, tetapi juga sejalan dengan kebutuhan responss di lapangan. Terkait teknik responss di lapangan, sejauh ini masih diperlukan pengembangan instrumentasi otomatis dan portabel yang mampu mengkarakterisasi bahan forensik nuklir dalam waktu singkat.

Menentukan komposisi komponen kunci pada sampel (misalnya, U, Pu, dan isotop turunannya) merupakan hal yang sangat penting. Namun, analisis pengotor dalam bahan dapat memberikan ciri khas, baik yang melekat maupun timbul dari pemrosesan dapat memberikan wawasan penting tentang riwayat sampel forensik nuklir dan memperjelas fungsi dari bahan nuklir tersebut. Fabrikasi dan pemrosesan ulang bahan bakar nuklir, misalnya, merupakan proses bertingkat yang menghasilkan produk yang mengandung berbagai pengotor yang dapat memberikan informasi tertentu. Ciri khas isotop timbal (Pb) menjadi contoh yang sangat baik sebagai pengotor yang berguna untuk penyelidikan forensik nuklir dalam menentukan asal sampel uranium (Fahey et al., 2010). Terdapat beberapa perdebatan mengenai teknik apa yang paling tepat untuk mewakili pendekatan ideal dalam penentuan rasio isotop dalam sampel forensik nuklir. Oleh karena itu,

pemahaman menyeluruh tentang pengotor sampel forensik nuklir sangat berharga. Pentingnya ciri khas pengotor tersebut menjadi dasar kebutuhan akan basis data forensik nuklir yang komprehensif. Basis data ini, idealnya, mampu memberi gambaran komposisi unsur yang diharapkan dan rasio isotop untuk bahan nuklir dari seluruh dunia. Variasi parameter ini yang akan dihasilkan dari pemrosesan selanjutnya. Selain itu, kebutuhan bahan referensi bersertifikat (*certified reference material*, CRM) dalam melakukan analisis sampel merupakan salah satu hal yang menjadi perhatian untuk memperoleh hasil analisis yang dapat dipertanggungjawabkan. Bahan referensi bersertifikat diproduksi oleh organisasi nasional dan internasional, yang berfungsi sebagai standar penting dalam penelitian forensik nuklir. Ini sangat penting untuk kalibrasi instrumen, validasi metode, dan penelusuran analitik, seperti yang terlihat dalam pengukuran pengenceran isotop. Kebutuhan akan standar baru dengan berbagai bentuk, termasuk

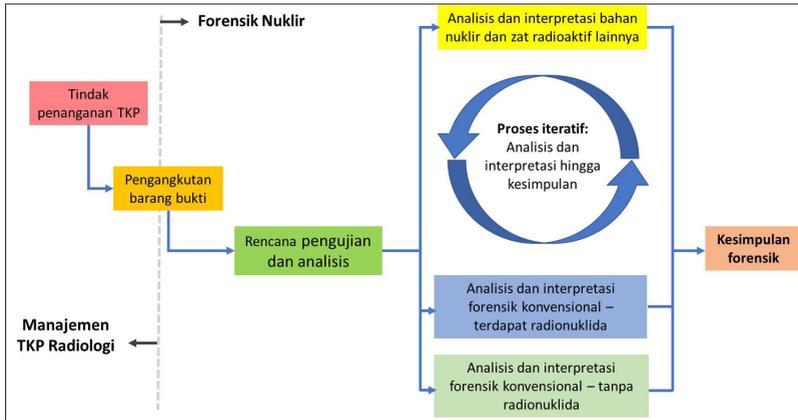
- 1) bahan referensi matriks lingkungan dengan kandungan aktinida yang diketahui;
- 2) bahan referensi pengenceran/rasio isotop; dan
- 3) standar kronometri yang mencerminkan usia bahan yang diketahui.

Idealnya, bahan tambahan (misalnya standar uranium oksida dengan isotop oksigen yang diketahui) tersedia dalam jumlah yang banyak untuk digunakan pada aplikasi khusus, *radiobioassay*, dan penelitian lingkungan. Penelitian yang mungkin harus dilakukan bertahun-tahun diperlukan untuk mengidentifikasi/memperoleh bahan sumber yang sesuai, menyiapkan sampel yang dihomogenisasi, dan mengesahkan standar referensi yang dibutuhkan oleh komunitas forensik nuklir.

C. Metodologi Forensik Nuklir

Forensik nuklir merupakan salah satu komponen yang perlu dikembangkan secara berkelanjutan dalam program nasional untuk keamanan nuklir. Forensik nuklir memiliki peran sebagai pencegah dan penanggap/respons terhadap suatu peristiwa terkait keamanan nuklir. Infrastruktur keamanan nuklir yang efektif secara nasional merupakan hal yang sangat penting untuk meyakinkan bahwa bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya tidak jatuh ke tangan yang salah. Dalam pencegah peristiwa keamanan nuklir, forensik nuklir dapat membantu mengidentifikasi kekurangan seperti pada akuntansi bahan nuklir atau sistem keamanan nuklir, baik pada tingkat fasilitas nuklir maupun pada tingkatan yang lebih tinggi. Selain itu, dengan mencanangkan dan meningkatkan kemampuan forensik nuklir akan membuat pelaku yang ingin menyelundupkan atau menyalahgunakan bahan nuklir dan radioaktif lainnya untuk berpikir ulang. Selain itu, sebagai penanggap, forensik nuklir dapat meningkatkan tanggap terhadap sebuah peristiwa keamanan nuklir. Dalam membantu investigasi kejahatan, forensik nuklir tetap berdasarkan forensik tradisional untuk menjaga aspek hukum barang bukti. Oleh karena itu, forensik nuklir sebagai rencana tanggap darurat nasional menjadi bagian yang tidak kalah penting dalam infrastruktur keamanan nuklir suatu negara. Ruang lingkup dari forensik nuklir diilustrasikan pada Gambar 5.1.

Gambar 5.1 mengilustrasikan kegiatan apabila terjadi sebuah peristiwa keamanan nuklir. Sisi kiri merupakan ruang lingkup kegiatan *radiological crime scene management* (manajemen TKP radiologi) dan sisi kanan merupakan ruang lingkup kegiatan forensik nuklir. Kegiatan forensik nuklir dimulai dari diterimanya barang bukti yang akan jadi sampel uji dalam kegiatan forensik nuklir. Namun, perlu disadari, pengumpulan barang bukti dari tempat kejadian perkara merupakan hal yang sangat menentukan akan keberhasilan kegiatan forensik seutuhnya.



Sumber: IAEA (2015)

Gambar 5.1 Model Rencana Aksi Forensik Nuklir

Tindak penanganan di TKP radiologi tidak berbeda dengan TKP pada umumnya. Perbedaan mendasarnya adalah perlunya penilaian bahaya radiologi pada TKP radiologi sehingga dalam tahapan pengambilan barang bukti diperlukan teknik khusus. Pengambilan dan pengumpulan barang bukti dilakukan dengan teknik tertentu agar TKP tidak berubah dan bahaya radiologi tetap dapat terkendali, di mana tidak membahayakan petugas lapangan ataupun masyarakat sekitar. Benda yang dapat dijadikan barang bukti, antara lain, serbuk sari, tanah/debu/serpihan tanah, bekas alat, peralatan kerja, jejak alat/sepatu/kendaraan, data digital, logam, residu proses, cairan tubuh, serat, rambut, sidik jari (*fingerprints*) dan lainnya. Untuk lingkup forensik nuklir, bila semua ini terkontaminasi bahan nuklir atau bahan radioaktif lainnya, tim analis forensik akan menentukan rencana pengujian dan analisis yang dikenakan pada barang bukti. Tujuan dari pengujian dan analisis adalah menemukan tersangka dan memberikan bukti dukung kepada pengadilan untuk mendakwa tersangka. Kegiatan forensik nuklir dilakukan pada barang bukti yang mengandung ataupun terkontaminasi bahan nuklir, atau bahan radioaktif lainnya. Pada barang bukti tersebut dilakukan juga kegiatan forensik tradisional seperti pada barang bukti yang umumnya. Proses forensik

Buku ini tidak diperjualbelikan

dilakukan secara iteratif, sesuai kebutuhan yang disepakati oleh tim analisis forensik untuk menyelesaikan kasus tersebut. Bila semua hasil uji dan analisis forensik sudah terpenuhi, kesimpulan hasil forensik digunakan untuk menentukan tersangka dan mendakwanya.

Dari penjelasan ini, bentuk dukungan forensik nuklir terhadap tanggap keamanan nuklir ialah melalui pendeteksian, kategorisasi, dan karakterisasi bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya. Pendeteksian merupakan bagian dari proteksi fisik, tetapi juga dapat menjadi bentuk dukungan pencegahan terjadinya peristiwa keamanan nuklir. Bila terjadi peristiwa keamanan nuklir, sebagai bentuk tanggap kejadian, dilakukan kategorisasi dan karakterisasi pada bahan nuklir, bahan radioaktif, ataupun barang bukti yang terkontaminasi.

Kategorisasi yang dilakukan adalah menentukan kategori barang bukti sebagai bahan nuklir (U, Pu) atau bahan nuklir lainnya (^{60}Co , ^{137}Cs dan ^{192}Ir). Kegiatan kategorisasi dapat dilakukan di TKP. Dengan kategorisasi tersebut, dapat diidentifikasi tingkat bahaya dari barang bukti bagi *responsder* pertama, personel lapangan, dan masyarakat sehingga dapat ditentukan penanganan yang tepat. Alat uji yang dapat digunakan, seperti detektor radiasi personal, peralatan identifikasi radionuklida, peralatan detektor kontaminasi alfa (α) atau beta (β), dan detektor gamma-HPGe portabel. Dalam proses ini, dapat diamati dan dicatat warna, bentuk, perkiraan jumlah atau beratnya, dan penanda yang jelas terbaca. Dari karakterisasi dengan detektor gamma-HPGe portabel, dapat diketahui komposisi radioisotop secara kasar. Proses yang dilakukan dapat menjawab pertanyaan mengenai sifat radioaktif dari barang bukti. Jika barang bukti bersifat radioaktif, akan diketahui jenis isotop dan pancaran radiasinya sehingga dapat ditentukan wadah yang tepat untuk membawa barang bukti ke laboratorium atau penyimpanan barang bukti. Informasi umum yang dapat diketahui, yakni tingkat bahaya radiasi bagi manusia dan lingkungan. Dari tingkat bahaya ini dapat ditentukan responss peristiwa keamanan nuklir yang tepat dan kebutuhan untuk dekontaminasi TKP. Selanjutnya, dapat disepakati perlu atau tidaknya pengujian lebih lanjut sehingga dapat diputuskan perlu atau tidaknya dilakukan kegiatan forensik nuklir

hingga kebutuhan untuk mencari bantuan pihak internasional, baik terkait uji dan informasi mengenai barang bukti maupun pencarian tersangkanya. Dari proses kategorisasi barang bukti ini, tentunya dapat ditentukan pelanggaran yang terjadi terhadap hukum nasional.

Karakterisasi barang bukti dilakukan di laboratorium. Kegiatan karakterisasi ini bertujuan untuk memberikan gambaran yang lebih dalam dari kategorisasi sehingga dapat menjawab asal usul bahan nuklir dan bahan radioaktif lainnya. Karakterisasi pendahuluan dapat dilakukan dalam waktu 24 jam sehingga informasi yang diperoleh dapat digunakan tim analis forensik untuk menyusun rencana analisis forensik lebih lanjut. Informasi yang diperoleh dalam tahapan ini adalah informasi lebih detail mengenai ukuran dan bentuk sampel, komposisi radioisotop, warna sampel, identitas/penanda pada sampel, topografi permukaan, dan bentuk fisik sampel. Peralatan yang digunakan adalah neraca, densitometer, mikroskop optik, dan spektrometer gamma-HPGe. Karakterisasi lebih lanjut dapat diselesaikan dalam waktu satu minggu hingga dua bulan. Hasil karakterisasi diharapkan dapat menjawab karakteristik fisik, kimia, rasio isotop, serta menentukan umur dari bahan nuklir dan radioaktif lainnya. Selain itu, informasi dari forensik tradisional diharapkan dapat menjawab keterkaitan antara pelaku, lokasi, dan peristiwanya.

Untuk memperoleh jawaban dari barang bukti, diperlukan ciri khas yang dapat membedakan satu dengan yang lain dari bahan nuklir dan radioaktif lainnya. Ciri khas ini meliputi karakteristik fisik, kimia, unsur, dan isotop dari bahan. Ciri khas ini akan memberikan gambaran riwayat proses hingga bahan tersebut terbentuk dan kemungkinan lokasi pembentukannya. Dua pendekatan yang penting untuk menggambarkan ciri khas ini adalah sebagai berikut:

- 1) penemuannya menggunakan pendekatan empiris, melalui analisis yang sistematis terhadap bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya; dan
- 2) berdasarkan pemodelan sifat fisis dan kimiawi dari proses nuklir.

Langkah lanjutan untuk menguatkan interpretasi hasil uji dapat dilakukan melalui kerja sama dengan laboratorium forensik nuklir lainnya. Selain itu, untuk membantu melakukan interpretasi hasil uji juga dapat memanfaatkan keahlian yang dimiliki personel dari institusi lain. Kegiatan forensik dapat dilakukan secara iteratif saat diperoleh hasil uji di luar hipotesis awal. Tim analisis forensik dapat mengambil keputusan untuk melakukan ulang kegiatan analisis tertentu. Proses iteratif ini dilakukan hingga diperoleh ciri khas yang dapat menguatkan interpretasi hasil uji secara keseluruhan atau memungkinkan untuk mengecualikan hasil uji di luar hipotesis awal.

Analisis yang dapat dilakukan untuk memperoleh ciri khas bahan nuklir dan radioaktif lainnya dapat dilakukan dengan berbagai metode, sebagai berikut.

- 1) Pengamatan visual pada barang bukti sehingga dapat diperoleh informasi identitas atau kemungkinan tanda khusus yang dapat menjadi ciri khasnya. Selanjutnya, informasi identitas dikombinasikan dengan pengukuran dimensi dan berat sehingga dapat ditentukan densitasnya. Warna yang tampak juga dapat menjadi indikator yang penting. Hal yang perlu menjadi perhatian adalah alat ukur yang digunakan harus terkalibrasi dengan baik.
- 2) Pengamatan sampel uji menggunakan mikroskop optik untuk memperoleh informasi karakteristik permukaan dengan perbesaran tertentu.
- 3) Pengamatan morfologi dengan perbesaran yang lebih tinggi dari mikroskop optik menggunakan *scanning electron microscope* (SEM). Dengan SEM, informasi morfologi yang diperoleh akan lebih banyak lagi. Metode SEM memberikan hasil yang relatif langsung, tetapi kualitas gambar yang dihasilkan dipengaruhi oleh preparasi sampelnya. SEM dilengkapi dengan spektrometer *energy dispersive X-ray* (EDX) atau spektrometer *wavelength dispersive X-ray* (WDX). EDX atau WDX dapat menentukan kandungan unsur pada resolusi luasan citranya, yaitu pada 0,1 μm dengan deteksi limit unsurnya sekitar 0,1%.

- 4) Analisis kandungan unsur dapat dilakukan menggunakan *X-ray fluorescence* (XRF). Analisis ini bersifat tidak merusak dengan deteksi limitnya hingga satuan *part per million* (ppm). Kendala yang mungkin dihadapi ialah saat mengukur unsur yang memiliki energi karakteristik sinar-X yang rendah.
- 5) Analisis sinar-X lainnya menggunakan *X-ray diffraction* (XRD) yang bertujuan untuk identifikasi struktur kimiawi dari bahan kristalin. Untuk bahan amorf tidak akan diperoleh pola difraksi dengan puncak-puncak difraksi yang tajam.
- 6) Teknik pengamatan struktur sampel menggunakan elektron yang juga melihat kristalinitas sampel dari difraksi elektron. Pengujian ini dapat dilakukan menggunakan *transmission electron microscope* (TEM).
- 7) Teknik mencacah aktivitas radiasi dapat mencacah radiasi. Teknik ini sangat bergantung dari pemancarnya. Pemancar radiasi yang menjadi perhatian dalam forensik nuklir adalah radiasi alfa dan gamma. Spektrometer gamma digunakan untuk kategorisasi awal bahan nuklir dalam forensik nuklir karena teknik ini tidak merusak dan mudah dalam preparasi sampelnya. Untuk kategorisasi dapat menggunakan spektrometer gamma portabel, dan untuk bahan dengan kandungan pemancar gamma yang rendah dapat menggunakan spektrometer gamma resolusi tinggi. Keunggulan lain dari spektrometer resolusi tinggi ini dapat memisahkan dua spektrum dengan energi yang berhimpit. Keterbatasan dari spektrometer gamma adalah tidak dapat membedakan nuklida ^{242}Pu dan ^{236}U .
- 8) Spektrometer alfa digunakan untuk mendeteksi partikel alfa berupa ion He^{2+} dengan energi pada rentang 3–8 MeV. Teknik ini termasuk pengujian merusak. Langkah penting selanjutnya adalah radiokimia untuk mengukur aktivitas ^{238}Pu dan $^{239+240}\text{Pu}$. Energi ^{239}Pu dengan ^{240}Pu sangat dekat dan tidak dapat dipisahkan satu sama lainnya sehingga dalam pengukurannya, merupakan jumlah gabungan keduanya.

- 9) Teknik untuk menentukan komposisi isotop unsur dalam sampel uji dapat menggunakan spektrometer massa. Komposisi unsur dapat ditentukan secara kuantitatif. Spektrometer massa mampu memberikan hasil analisis dengan presisi dan akurasi tinggi. Teknik spektrometer massa yang sering digunakan adalah *thermal ionization mass spectrometry* (TIMS), *inductively coupled plasma mass spectrometry* (ICP-MS), *secondary ion mass spectrometry* (SIMS), dan *gas chromatography-mass spectrometry* (GC-MS). Tiap jenis spektrometer ini memiliki keunggulan dan kekurangan. Tim analis forensik nuklir dapat menggunakan perangkat spektrometer massa yang sesuai dengan kebutuhan.
- 10) Radiografi merupakan teknik yang digunakan untuk melihat distribusi dan aktivitas radionuklida dalam sampel.
- 11) Teknik luar biasa untuk melakukan analisis unsur adalah dengan teknik aktivasi neutron. Teknik ini meradiasi bahan dengan radiasi neutron dan melakukan identifikasi radiasi gamma yang merupakan pancaran dari unsur hasil luruh dari unsur induk yang ada di dalam bahan. Keuntungan dari teknik ini dapat menentukan multi unsur dengan sensitivitas yang luar biasa dan selektivitas yang tinggi. Analisis aktivasi neutron tidak memerlukan waktu untuk melakukan pemisahan dari sampel. Namun, perlu dipahami bahwa teknik ini membutuhkan reaktor nuklir untuk melakukan aktivasi (Stanley, Stalcup, & Spitz, 2013).

D. Data Forensik Nuklir

Keberhasilan dalam analisis kegiatan forensik nuklir adalah dapat ditentukannya asal usul dari bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya yang ditemukan di TKP. Keberhasilan ini didukung dengan ketersediaan data “sidik jari” dari bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya yang menjadi ciri khas. Data ini menjadi basis data sebagai pembanding terhadap sampel uji. Data dalam basis data dapat diperoleh atau disediakan dari produsen bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya. Namun, lembaga yang memiliki kemampuan forensik nuklir pun dapat melakukan identifikasi dan mengoleksi hasil yang diperoleh

dalam basis data. Informasi kategori karakteristik bahan nuklir dan radioaktif lainnya telah diberikan oleh IAEA (2018). Pada Tabel 5.2, diberikan informasi karakteristik untuk bahan galian (deposit dan bijih).

Tabel 5.2 Karakteristik Deposit Geologi

Karakteristik	Elemen Data	Diskriminator Data	Catatan
Geologi	<ul style="list-style-type: none"> • Lokasi penambangan • Formasi geologi • Tipe deposit • Teknik penambangan • Warna 	Tinggi	Deskripsi yang terkait karakteristik geologi bahan
Mineralogi	<ul style="list-style-type: none"> • Kandungan mineral • Komposisi kimia dari mineral • Persen volume dari mineral 	Rendah	Mineral yang teridentifikasi sebagai bagian eksplorasi dan proses penambangan
Konsentrasi Uranium	<ul style="list-style-type: none"> • Konsentrasi uranium • Ketidakpastian konsentrasi uranium 	Rendah	Dinyatakan dalam g/ton
Isotop Uranium	<ul style="list-style-type: none"> • Rasio isotop • Ketidakpastian rasio isotop 	Rendah	$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$ dan $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$

Karakteristik	Elemen Data	Diskriminator Data	Catatan
Isotop Stabil	<ul style="list-style-type: none"> • Nama isotop • Menggunakan satuan standar untuk sistem isotop tertentu • Ketidakpastian 	Tinggi	<ul style="list-style-type: none"> • Menambahkan rasio isotop yang serupa dengan Pb • Per mil (‰) untuk unsur C, O, N, S • Rasio $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ untuk Sr • Komposisi isotop radiogenik terlarut dari Nd (ϵNd) • Rasio isotop untuk Pb ($^{204}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{208}\text{Pb}$)
Unsur renik	<ul style="list-style-type: none"> • Konsentrasi unsur renik • Ketidakpastian Konsentrasi unsur renik 	Tinggi	Disajikan dalam $\mu\text{g/g}$ sampel

Source: IAEA (2018)

Karakteristik yang menggambarkan deposit geologi dalam Tabel 5.2 terdiri dari karakteristik bahan, seperti karakteristik geologi, mineralogi, konsentrasi uranium, isotop uranium, isotop stabil (isotop yang tidak bersifat radioaktif) tertentu, serta unsur renik. Tiap karakteristik memiliki elemen data yang merupakan parameter intrinsik dari karakteristik terkait. Sebagai contoh, isotop uranium memiliki parameter intrinsik sebagai elemen data yang akan disimpan dalam basis data berupa rasio isotop dan ketidakpastian rasionya. Selanjutnya, seberapa besar elemen data ini akan memberi dampak terhadap kekhlasan bahan yang dianalisis, diberikan dalam kolom diskriminan data. Jika diskriminator data bernilai rendah, elemen data tersebut menempati urutan yang bukan prioritas untuk

menunjukkan kekhasan dari bahan. Sebaliknya, jika diskriminator data bernilai tinggi, elemen data tersebut merupakan prioritas utama sebagai ciri khas dari bahan. Pada kolom terakhir diberikan informasi tambahan, mengenai bentuk data dan satuan apa yang perlu disimpan dalam basis data. Data ini dapat disusun dalam satu basis data yang komprehensif dan diintegrasikan dengan National Nuclear Forensics Library (NNFL). NNFL adalah suatu sistem yang tidak hanya berisi sekedar pustaka atau basis data dari “sidik jari” bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya yang telah diketahui, tapi juga merupakan perangkat forensik nuklir yang terdiri atas sumber data dan informasi ilmiah. Teknis, peraturan, dan administratif terkait bahan radionuklida yang dibuat, digunakan atau disimpan, dan dilengkapi dengan sejumlah ahli untuk mendukung pengujian sampel bahan radionuklida untuk mengevaluasi data dan informasi serta untuk mengambil kesimpulan terkait asal usul bahan (Vesterlund et al., 2022). Pengembangan NNFL membutuhkan mandat karena diperlukannya koordinasi antara para ahli, regulator, penegak hukum dan entitas lainnya yang berkepentingan. Basis data bahan dalam NNFL sangat dinamis. Keberlanjutan dan kebaruan data dalam NNFL memerlukan hal-hal sebagai berikut.

- 1) dilakukannya identifikasi dan/atau dimilikinya informasi, baik bahan alam maupun bahan nuklir dan zat radioaktif yang berada dalam kendali peraturan;
- 2) dilakukannya evaluasi secara berkala terhadap data yang dimiliki untuk dikomparasi dengan hasil uji dari laboratorium lain (melakukan *round robin test*) dan dibandingkan dengan data yang disediakan oleh produsen bahan nuklir dan zat radioaktif;
- 3) dilakukannya indentifikasi secara berkala dan direncanakan pengambilan data untuk mengisi celah informasi terkait elemen data dengan diskriminator tinggi;
- 4) dikembangkannya basis data sesuai dengan kebutuhan internal dan spesifik; serta
- 5) dikembangkannya perangkat dan/atau metode untuk analisis yang valid.

Kontribusi NNFL bagi keamanan nuklir dapat membantu investigasi dalam mengenali bahan sitaan yang tidak diketahui asal usulnya dan melakukan kaji ulang pada peraturan mengenai kepemilikan dan pemanfaatan bahan nuklir dan bahan radioaktif lainnya. Terkait responss terhadap kejadian keamanan nuklir, NNFL dapat memberikan interpretasi forensik nuklir, asal usul bahan dan penilaian untuk mendukung investigasi, serta pendakwaan dan peningkatan keamanan. Selain itu, peran NNFL bagi dunia internasional adalah menjawab permasalahan internasional dan mendorong pertukaran informasi, serta mendukung investigasi multinasional.

E. Forensik Nuklir di Indonesia

Terikatnya forensik nuklir dengan keamanan nuklir dan peristiwa keamanan nuklir mejadikan perlunya landasan hukum berdasarkan peraturan BAPETEN, sebagai badan regulator ketenaganukliran di Indonesia. Untuk peristiwa keamanan nuklir secara nasional, telah dibentuk Organisasi Tanggap Darurat Nuklir Nasional (OTDNN) sejak akhir tahun 2006 (Apriliani, 2014). Selain itu, jika menyangkut aspek legal hukum, kegiatan forensik sudah tertuang dalam Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2002 tentang Kepolisian Negara Republik Indonesia pada pasal 14 ayat 1.h yang tertulis

“Kepolisian Negara Republik Indonesia (Polri) bertugas menyelenggarakan identifikasi kepolisian, kedokteran kepolisian, laboratorium forensik, dan psikologi kepolisian untuk kepentingan tugas kepolisian.”

Dari butir tersebut telah jelas bahwa kegiatan identifikasi dan laboratorium forensik dilakukan oleh Polri. Dapat dipahami, perundangan ini berguna untuk menjamin aspek legal dari barang bukti hingga kasus selesai. Di tahun 2013, kegiatan forensik nuklir di Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, Badan Tenaga Nulir Indonesia (PTBBN-BATAN) mulai dikembangkan melalui kegiatan kerja sama riset dan pengembangan kapasitas dengan IAEA, Australian Nuclear Science and Technology Organization (ANSTO), dan Integrated

Support Center for Nuclear Nonproliferation and Nuclear Security, Japan Atomic Energy Agency (ISCN-JAEA). Jika melihat kapabilitas BATAN sebagai badan pelaksana ketenaganukliran yang telah berdiri sejak tahun 1958, BATAN memiliki fasilitas yang mumpuni untuk karakterisasi bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya, meskipun pada awalnya tidak ditekankan untuk kegiatan forensik nuklir melainkan pengembangan bahan bakar nuklir. Sadar akan peran BATAN dalam kegiatan forensik yang merupakan tugas utama Polri, kegiatan forensik nuklir di BATAN lebih berfokus pada peningkatan kemampuan personel dalam

- 1) melakukan analisis sampel uji dari barang bukti;
- 2) melakukan analisis terhadap bahan nuklir yang dimiliki BATAN;
- 3) menentukan ciri khas bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya sehingga menjadi “sidik jari”;
- 4) mengoleksinya dalam basis data; dan
- 5) melakukan kolaborasi, baik dalam negeri maupun luar negeri, dalam rangka meningkatkan kemampuan personel dalam analisis.

Selain aktivitas riset dan pengembangan forensik nuklir di BATAN sejak 2014 hingga 2021, beberapa kegiatan yang terkait forensik nuklir secara umum juga telah dilakukan, seperti pemanfaatan teknik analisis radiometri untuk karakterisasi timbal dan partikulat udara. Mengingat kegiatan forensik nuklir merupakan bagian dari forensik pada umumnya, BATAN telah menjalin hubungan erat dengan Polri, Tentara Nasional Indonesia (TNI), dan BAPETEN untuk koordinasi keamanan nuklir dan peningkatan kapasitas personel terkait keamanan nuklir pada umumnya dan forensik pada khususnya. Dalam peristiwa keamanan nuklir di tahun 2020, tersebar zat radioaktif di lahan kosong suatu perumahan. Saat kejadian tersebut, tim forensik nuklir BATAN membantu Polri dan BAPETEN dalam melakukan analisis dan interpretasi barang bukti. Di sisi lain, personel forensik nuklir BATAN juga berperan aktif di kegiatan internasional, seperti partisipasi dalam beberapa pelatihan untuk peningkatan kapasitas personel dalam melakukan analisis bahan nuklir dan zat radioaktif

lainnya yang menjadi barang bukti. Kelompok forensik nuklir BATAN memperoleh dukungan kegiatan dan dana untuk pengembangan riset forensik nuklir dari IAEA melalui *Coordinated Research Project* (CRP) untuk periode 2014–2016 dengan judul *Identification of High Confidence Nuclear Forensics Signatures for the Development of a National Nuclear Forensics Library* dan untuk periode 2019–2023 dengan judul *Web-Based Nuclear Forensics Library for Evidence Database Platforms*.

Seiring dengan perkembangan organisasi riset di Indonesia, BATAN berintegrasi menjadi Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) sejak September 2021. Dalam reorganisasi ini terjadi perubahan organisasi riset dan struktur pusat risetnya. Kegiatan riset di BATAN berubah menjadi di bawah Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN). Kegiatan forensik nuklirnya pun tidak lagi di Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir. Kegiatan forensik nuklir dilakukan oleh kelompok riset keamanan dan seifgard (garda aman) reaktor nuklir dalam naungan Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir (PRTRN).

F. Penutup

Forensik nuklir merupakan perangkat bagi keamanan nuklir, baik dengan perannya dalam analisis barang bukti dari suatu kejadian keamanan nuklir maupun membantu menemukan celah kekurangan dalam sistem keamanan nuklir. Analisis forensik nuklir merupakan disiplin ilmu yang terus berkembang. Saat ini, kolaborasi antarlaboratorium secara internasional telah dilakukan dalam pengembangan forensik nuklir. Pendekatan yang dilakukan dalam kolaborasi ini memanfaatkan basis pengetahuan mengenai proses untuk memperkirakan ciri khas sifat fisik, kimia, unsur, atau isotop yang dapat dihitung sehingga hasil perkiraan tersebut dapat diverifikasi keberadaan ciri khasnya oleh seperangkat teknik analisis. Riset dan pengembangan dalam forensik nuklir sangat penting karena dinamisnya bidang forensik nuklir. Kolaborasi internasional dalam forensik nuklir dengan memanfaatkan sumber daya setiap kolaborator sangat memungkinkan diperolehnya capaian yang luar biasa. Salah satu indikator capaian dari forensik nuklir adalah turunnya peristiwa keamanan nuklir.

Basis data NNFL yang berisi sidik jari bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya merupakan salah satu bidang dalam forensik nuklir yang memerlukan pengembangan berkelanjutan, baik sistem basis data maupun kekinian datanya. Data mengenai sidik jari bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya sangat penting saat digunakan sebagai pembanding terhadap hasil karakterisasi barang bukti pada peristiwa keamanan nuklir. Dengan data yang semakin lengkap, akan memperbesar kemungkinan barang bukti dapat dijustifikasi mengenai asal usul dan informasi barang bukti. Pengembangan desain basis data NNFL dibuat secara spesifik dan sesuai dengan kebutuhan yang ada. Hal lain yang perlu mendapat perhatian adalah peningkatan kemampuan personel dalam melakukan identifikasi sidik jari dan forensik tradisional dari bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya yang baru dan berada dalam kendali peraturan. Prototipe basis data NNFL di BATAN saat ini bergabung dalam prototipe portal keamanan nuklir BATAN.

Kegiatan riset dan pengembangan forensik nuklir sangat perlu mendapat ruang gerak dan perhatian sebagai satu kesatuan dengan sistem keamanan nuklir. Riset dan pengembangan forensik nuklir perlu memperoleh dukungan peralatan analisis dan laboratorium yang mampu menangani bahan nuklir dan zat radioaktif lainnya dalam tingkat paparan radiasi dan dimensi tertentu. Laboratorium yang dilengkapi dengan hot cell serta peralatan preparasi dan peralatan analisis berfungsi untuk mendeteksi karakteristik yang memiliki elemen data dengan diskriminator data yang tinggi. Kegiatan riset dan pengembangan tersebut bertujuan untuk meningkatkan presisi dan sensitivitas, serta menurunkan ukuran spasial sehingga akan mendorong peningkatan kepercayaan data yang diperoleh. Kepercayaan data yang tinggi akan memperkuat pendakwaan terhadap tersangka dalam peristiwa kejadian nuklir. Di Indonesia, terdapat fasilitas yang memadai, tetapi masih terdapat beberapa keterbatasan. Kegiatan forensik nuklir saat ini berada di bawah wewenang Departemen Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran (DPFK)–BRIN bersama dengan fasilitas untuk pengembangan bahan bakar nuklir. Tentu akan lebih ideal jika laboratorium untuk forensik nuklir bisa didirikan dan didedikasikan untuk riset dalam forensik nuklir.

Daftar Referensi

- Apikyan, S., & Diamond, D. (Eds.). (2015). *Nuclear threats and security challenges*. Los Angeles: Springer.
- Apriliani, D. (2014). Peran forensik nuklir dalam investigasi peristiwa keamanan nuklir di Indonesia. Dalam *Prosiding seminar keselamatan nuklir 2014* (86–91). Badan Pengawas Tenaga Nuklir.
- Fahey, A., Ritchie, N., Newbury, D., & Small, J. (2010). The use of lead isotopic abundances in trace uranium samples for nuclear forensics analysis. *Journal of radioanalytical and nuclear chemistry*, 284(3), 575–581. <https://doi.org/10.1007/s10967-010-0509-5>
- International Atomic Energy Agency. (2015). Nuclear forensics in support of investigations. *IAEA Nuclear Security Series No. 2-G (Rev.1)*. <https://www.iaea.org/publications/10797/nuclear-forensics-in-support-of-investigations>
- International Atomic Energy Agency. (2018). Development of a national nuclear forensics library: A system for the identification of nuclear or other radioactive material out of regulatory control. <https://www.iaea.org/publications/13438/development-of-a-national-nuclear-forensics-library-a-system-for-the-identification-of-nuclear-or-other-radioactive-material-out-of-regulatory-control>
- International Atomic Energy Agency. (2022). *Incident and trafficking database (ITDB)-2022 Factsheet*. <https://www.iaea.org/resources/databases/itdb>.
- Mayer, K., Wallenius, M., & Fanghänel, T. (2007). Nuclear forensic science— from cradle to maturity. *Journal of Alloys and Compounds*, 444, 50–56. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838807003659>
- Mayer, K., Wallenius, M., Lützenkirchen, K., Galy, J., Varga, Z., Erdmann, N., ... Fifield, K. (2011). Nuclear forensics: A methodology applicable to nuclear security and to non-proliferation. *Journal of Physics: Conference Series*, 312, 062003. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/312/6/062003>
- Stanley, F. E., Stalcup, A. M., & Spitz, H. B. (2013). A brief introduction to analytical methods in nuclear forensics. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 295, 1385–1393. <https://doi.org/10.1007/s10967-012-1927-3>
- Undang-undang Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2002 tentang Kepolisian Negara Republik Indonesia. (2002). <https://peraturan.bpk.go.id/Details/44418/uu-no-2-tahun-2002>

Vesterlund, A., Canaday, J., Chamberlain, D. B., Curry, M. R., Sandström, B., Schnaars, D. D., & Ramebäck, H. (2022). National nuclear forensics libraries: A case study on benefits and possibilities for identification of sealed radioactive sources. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 331(1), 639–643. <https://doi.org/10.1007/s10967-021-08100-4>

Buku ini tidak diperjualbelikan

