

PERANAN FORENSIK NUKLEAR DALAM ISU KESELAMATAN NUKLEAR

Oleh

Zalina Laili dan Nazharatul Ashifa Abdullah Salim

Kumpulan Aplikasi Kimia Analisis, Bahagian Teknologi Sisa & Alam Sekitar

Agensi Nuklear Malaysia, 43000 Kajang, Selangor, Malaysia

1. Pengenalan

Sains forensik biasanya dikaitkan dengan pemeriksaan spesimen/bukti kes jenayah menggunakan kaedah sains (Foto 1). Kini, skop sains forensik telah diperluaskan dan diaplikasikan dalam bidang sains nuklear. Ini dikenali sebagai forensik nuklear. Bidang forensik nuklear tercetus susulan daripada kejatuhan Kesatuan Soviet pada awal tahun 1990-an. Kejatuhan Kesatuan Soviet ini telah mencetuskan fenomena penyeludupan bahan nuklear (Mayer et al. 2007). Kes terawal dilaporkan berlaku di Switzerland dan Itali pada tahun 1991. Seterusnya insiden penyeludupan bahan nuklear ini turut dilaporkan berlaku di Jerman, Republik Czech, Hungary dan di Eropah Tengah. Agensi Tenaga Atom Antarabangsa (IAEA) telah merekodkan lebih daripada 800 kes perdagangan haram bahan nuklear (IAEA 2006). Keadaan ini boleh memberi ancaman terhadap keselamatan dunia terutama apabila ia dikaitkan dengan aktiviti penganas.

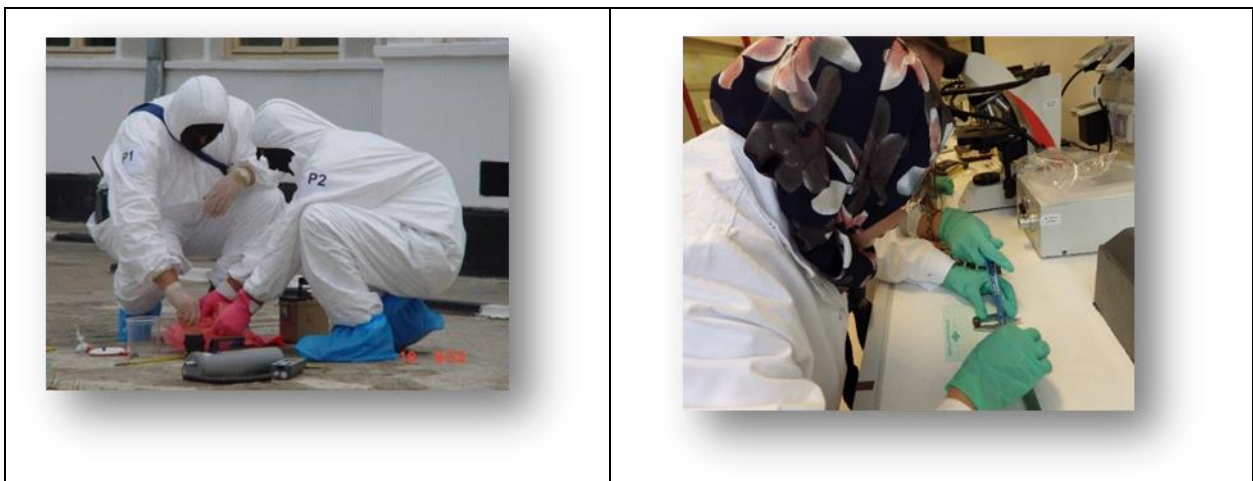


Foto 1 Forensik nuklear bidang sains baru yang diwujudkan bagi penyiasatan bahan nuklear dan bahan radioaktif lain yang berada diluar kawalan undang-undang.

Forensik nuklear dibangunkan untuk mengenal pasti dan mencirikan bahan radioaktif haram. Ia juga dibangunkan untuk mengetahui keaslian dan penggunaannya serta asal usul dan laluan pengedarannya. Justeru, forensik nuklear boleh ditafsirkan sebagai pemeriksaan bahan nuklear atau bahan radioaktif lain atau bahan bukti yang dicemari dengan radionuklid dalam konteks undang-undang antarabangsa atau undang-undang negara atau keselamatan nuklear (Keegan et al. 2016). Dari segi saintifik pula, forensik nuklear ialah satu analisis untuk menentukan ciri fizik, kimia, unsur, isotopik bahan nuklear yang tidak diketahui asal usulnya (Glaser & Bielefeld

2008). Hakikatnya, forensik nuklear bertujuan untuk mencari asal usul bahan nuklear yang ditemui berada di luar kawalan undang-undang. Objektif forensik nuklear boleh dibahagikan kepada beberapa perkara (Glaser & Bielefeld 2008) iaitu menentang aktiviti perdagangan gelap bahan nuklear, persampelan alam sekitar bagi mengesan aktiviti haram berkaitan bahan nuklear, mengimplementasikan 'IAEA safeguards', pengesahan pematuhan triti antarabangsa (*Comprehensive Test Ban Treaty* (CTBT)) dan *Non-Proliferation Treaty* (NPT)) dan pencegahan pada peringkat awal.

Bahan nuklear dan lain-lain bahan beradioaktif terdapat di dalam kitaran bahan api nuklear dan digunakan dalam industri, perubatan, penyelidikan dan penggunaan saintifik yang lain. Bahan beradioaktif ini merbahaya kerana ia mengeluarkan sinaran dengan keaktifan yang tinggi dan signifikan. Kebanyakan rampasan bahan radioaktif yang dilaporkan merupakan punca radioaktif seperti Cs-137, Ir-192, Co-60 atau Sr-90 yang asalnya digunakan dalam bidang perubatan atau industri (Mayer & Wallenius 2009). Sekiranya bahan radioaktif tersebut tersedia dalam jumlah yang mencukupi dan berkualiti kemungkinan ia akan digunakan dalam peranti letupan.

Oleh yang demikian, bahan radioaktif dikawal secara ketat di bawah undang-undang di peringkat negara mahupun di peringkat antarabangsa. Adalah menjadi tanggungjawab sesebuah negara untuk membina infrastruktur tertentu bagi melindungi bahan nuklear dan lain-lain bahan beradioaktif. Ini termasuklah langkah mencegah, mengesan serta mengambil tindakan terhadap insiden yang berkaitan dengan keselamatan nuklear. Apabila bahan nuklear dan lain-lain bahan beradioaktif dikesan berada di luar kawalan undang-undang, sesebuah negara harus mengambil tindakan sewajarnya dan ini termasuklah mengimplementasikan forensik nuklear dalam siasatan mereka. Kertas kerja ini akan membincangkan peranan dan elemen utama dalam bidang forensik nuklear yang merupakan kunci kepada keselamatan nuklear.

2. Peranan dan Pendekatan Asas Forensik Nuklear

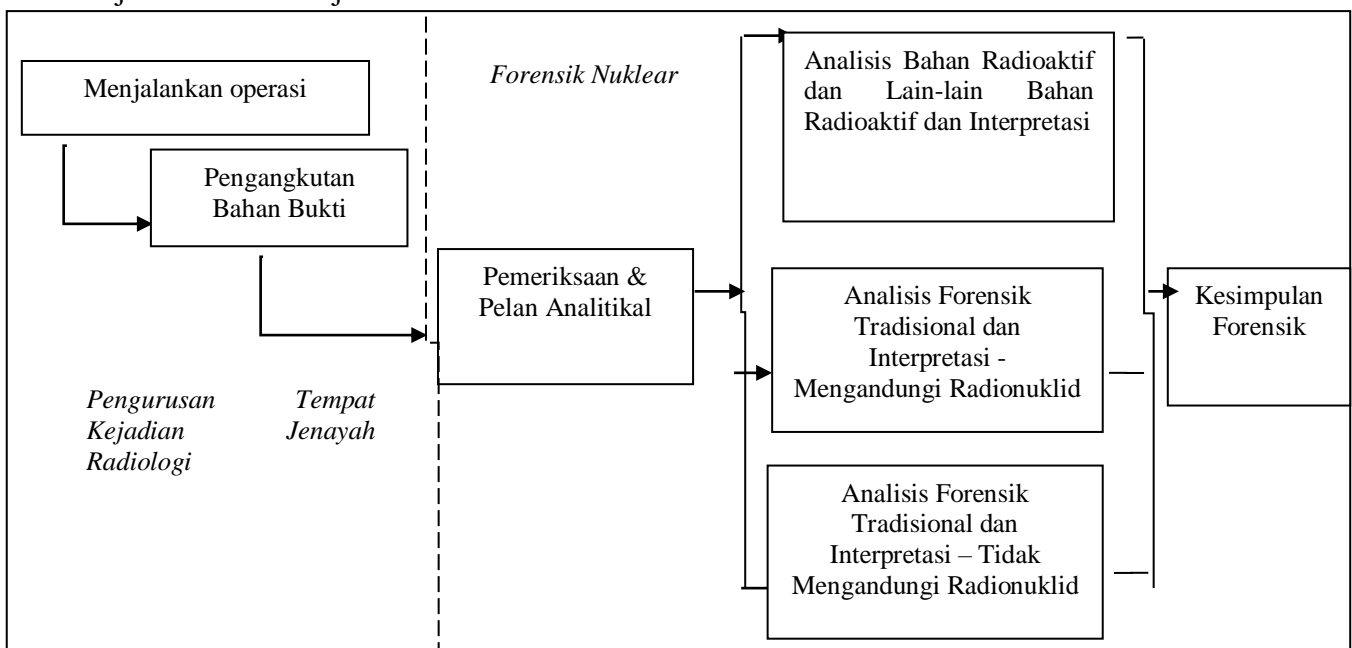
Forensik nuklear menyokong ke arah pencegahan dan memberi tindakbalas terhadap sesuatu insiden yang berkaitan dengan keselamatan nuklear. Perkara ini disebabkan forensik nuklear merupakan salah satu elemen penting dalam pelan tindakan bagi sesuatu insiden yang berkaitan dengan keselamatan nuklear.

Secara umumnya, terdapat beberapa tujuan utama dalam penyiasatan forensik nuklear. Forensik nuklear dijalankan untuk mengenal pasti mereka yang terlibat dalam kecurian nuklear atau penganas nuklear. Pengeluaran dan penggunaan bahan nuklear sama ada untuk pengeluaran tenaga, penggunaan perubatan, kegunaan ketenteraan atau lain-lain penggunaan melibatkan kitaran pengeluaran yang berskala besar. Misalnya proses kimia, penyinaran, kitar semula dan pelupusan sisa. Di setiap proses ini, ciri isotopik, kimia dan fizikal atau tanda pengenalan unik akan dibentuk. Justeru, pengukuran sampel dari jenis yang sama dan diketahui asal usulnya boleh membantu interpretasi data analisis yang diperlukan dalam penyiasatan forensik nuklear. Ia dapat memberi petunjuk yang akan menjurus kepada individu yang terlibat, tempat dan kejadian. Contohnya pada 29 Mei 1999, pihak kastam Bulgaria menahan seorang penyeludup dan menemui bekas plumbum berbentuk silinder dan di dalamnya terdapat satu

ampul kaca yang mengandungi 4g serbuk hitam. Hasil analisis makmal ia dikenal pasti sebagai uranium diperkaya tinggi (*Highly Enriched Uranium* (HEU)). Dua tahun kemudian iaitu Jun 2001 di Perancis, pihak keselamatan telah dimaklumkan terdapat seorang individu yang cuba menjual HEU. Hasil pemeriksaan di dalam kenderaan suspek menemui bekas plumbum berbentuk silider yang juga terdapat satu ampul kaca yang mengandungi 500g serbuk hitam halus. Keserupaan pada bekas plumbum berbentuk silider dan ampul kaca yang mengandungi serbuk hitam pada kedua-dua kes tersebut telah menimbulkan persoalan sama ada kedua kes ini saling berkaitan. Kemungkinan ia berasal dari negara, fasiliti, proses dan kelompok bahan yang sama. Analisis makmal oleh *Lawrence Livermore National Laboratory* (LLNL) mendapati terdapat keserupaan pada kedua bahan tersebut. Keserupaan pada komposisi isotopik uranium daripada kedua-dua kes mencadangkan bahawa ia berasal daripada sumber yang sama (negara, fasiliti dan proses (Keegan et al. 2016).

Forensik nuklear juga bertujuan untuk digunakan sebagai alat untuk menyekat aktiviti perdagangan haram bahan nuklear atau bahan sinaran lain. Ini kerana forensik nuklear dapat mempertingkatkan perlindungan dan pengawalan bahan nuklear dan senjata nuklear. Selain daripada itu, forensik nuklear juga dapat menjejaki bahan atau peranti nuklear yang hilang.

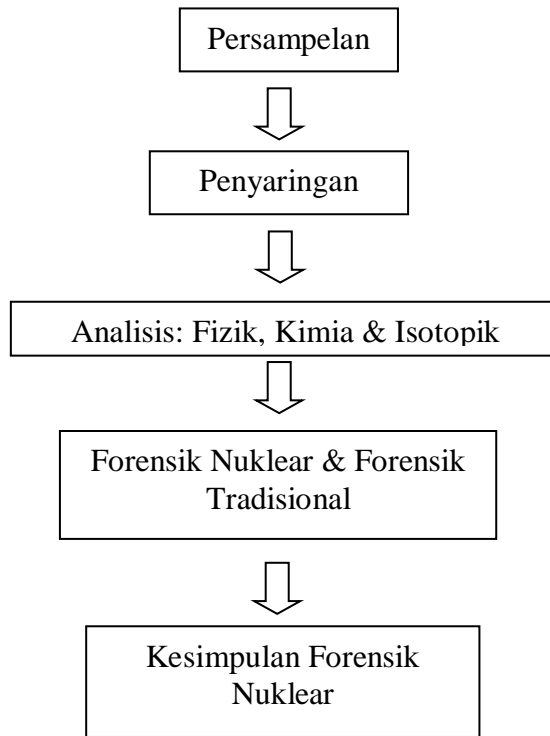
Penyiasatan dalam forensik nuklear harus dipertimbangkan sebagai sebahagian daripada set pengukuran komprehensif bagi pengesanan, penyekatan, pengkategorian dan pencirian bahan nuklear haram (Mayer & Wallenius 2009). Oleh itu, adalah sangat penting untuk memastikan integriti dan kesahan bukti pada keseluruhan proses dalam penyiasatan forensik nuklear. Ini menuntut kepada kerjasama rapat di antara penguatkuasa undang-undang, perkhidmatan perlindungan sinaran, pakar forensik dan pakar analisis forensik nuklear. Bagi menjamin kelancaran proses penyiasatan forensik nuklear, pelan model tindakan forensik nuklear (*Nuclear forensic model action plan*) perlu dibangunkan. Pelan model tindakan forensik nuklear ditunjukkan dalam Rajah 1.



Rajah 1 Pelan Model Tindakan Forensik Nuklear (IAEA 2015).

3. Pendekatan Metodologi Forensik Nuklear

Penyiasatan forensik nuklear akan bermula apabila sesuatu bahan dirampas dan dikategorikan sebagai bahan nuklear. Keseluruhan proses analisis forensik nuklear digambarkan dalam Rajah 2.



Rajah 2 Proses yang Terlibat dalam Analisis Forensik Nuklear (Karpas 2015).

Dalam forensik nuklear, tiada aliran proses yang universal atau pelan analisis bagi setiap sampel yang diterima di makmal. Pilihan teknik yang digunapakai pada setiap sampel bergantung kepada persoalan penyiasatan yang dibangkitkan dan jawapan serta tempoh yang tersedia bagi menjawab kepada persoalan tersebut (Keegan et al. 2016). Pihak IAEA telah menyediakan panduan berkaitan kaedah makmal dan teknik yang boleh digunapakai ketika menjalankan forensik nuklear dengan skala masa bagi melengkapkan analisis (24 jam, 1 minggu dan 2 bulan). Jadual 1 menunjukkan garis masa dan jenis teknik dalam analisis forensik nuklear yang biasa dijalankan.

Jadual 1 Garis Masa bagi Analisis Forensik Nuklear (Hutcheon et al. 2013 & Keegan et al. 2015)

Teknik/Kaedah	24 jam	1 minggu	2 bulan
Radiologi	Penentuan Aktiviti Kadar Dos (α , β , γ , n) Kontaminasi Permukaan	Jumlah	
Pencirian Fizikal	Pemeriksaan Visual Radiografi Fotografi Berat Dimensi Mikroskopi Optik Ketumpatan		
Analisis Tradisional	Forensik Cap jari, Fiber		
Analisis Isotopik	Spektroskopi- γ Spektroskopi- α	Spektrometri Jisim (SIMS, TIMS,	Pengasingan radiokimia
Elemen/Kimia		ICP-MS XRF Asai (penitratan, IDMS)	GC/MS

Penyiasatan forensik nuklear secara amnya menjurus kepada informasi yang dibawa oleh bahan nuklear tersebut. Bahan nuklear biasanya berasal daripada punca antropogenik iaitu hasil daripada pemprosesan bahan nuklear. Bahan nuklear boleh diperolehi sama ada daripada proses perlombongan uranium atau proses tangkapan neutron (dalam reaktor). Proses yang dilalui semasa pengeluaran bahan nuklear ini akan menentukan komposisi unsur, isotopik, mikroskopik dan makroskopik bahan tersebut (Mayer et al. 2005). Kesemua parameter tersebut boleh diukur menggunakan teknik analitik tertentu (Foto 2). Sesetengah parameter pula boleh digabungkan dan dikenali sebagai cap jari nuklear yang menggambarkan mod pengeluaran bahan tersebut. Selain daripada itu, istilah tanda pengenalan (*signatures*) digunakan. Ia menggambarkan ciri bahan seperti isotopik, kelimpahan, kepekatan unsur, bentuk fizik dan kimia dan dimensi fizikal yang boleh digunakan untuk mengaitkannya dengan bahan nuklear atau bahan radioaktif lain, terhadap individu, lokasi dan proses (Keegan et al. 2016).

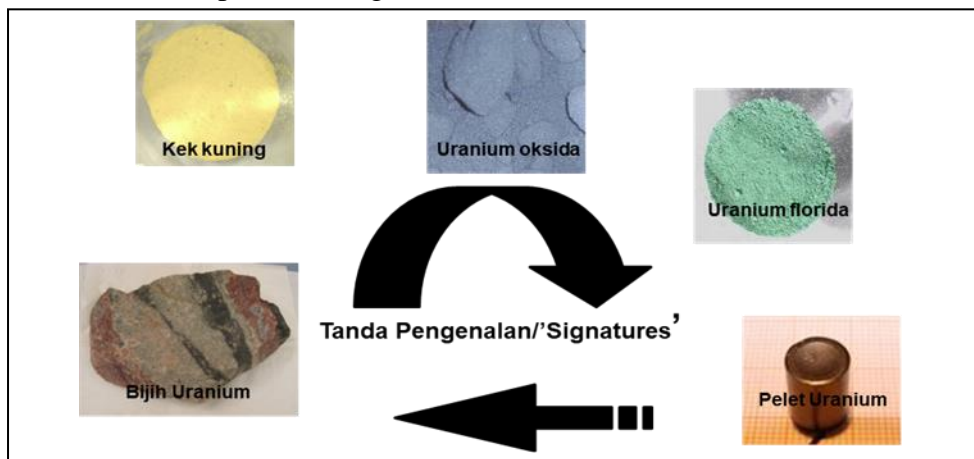


Foto2 Pengenalpastian tanda pengenalan/*signatures* bahan nuklear yang dirampas adalah faktor penting dalam mengenal pasti asal-usul bahan tersebut

Secara umumnya, analisis forensik nuklear bukanlah satu analisis yang mudah kerana ia melibatkan pendekatan lelaran (*iterative approach*) dengan keputusan yang diperolehi daripada satu analisis digunakan sebagai panduan untuk analisis yang seterusnya (Hutcheon et al. 2015). Teknik analitikal yang digunakan dalam penyiasatan forensik nuklear boleh dikategorikan kepada dua iaitu kaedah kimia gunaan dan analitikal fizik dan kaedah radioanalitikal. Jadual 2 menunjukkan ringkasan teknik analitikal yang biasa digunakan dalam penyiasatan forensik nuklear.

Jadual 2 Ringkasan Teknik Analisis yang Digunakan Dalam Forensik Nuklear (Mayer et al. 2004 & Keegan et al. 2015).

Teknik/ Kaedah	Jenis Alat	Kegunaan
Analisis Pukal	Pendarfluor Sinar-x (<i>x-ray Fluorescence, XRF</i>) dan Belauan Sinar-x (<i>x-ray Diffraction, XRD</i> ,	Pencirian komposisi unsur dan isotopik bahan pukal
	Spektrometri Plasma Berganding (secara Aruhan (<i>Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry, ICPMS</i>), Spektrometer Gama, Spktrometri Jisim Penginonan Terma (<i>Thermal Ionization Mass Spectrometry, TIMS</i>),	Mengesan unsur surih dalam bahan
Pengimejan	Mikroskopi Optik	Menentukan kehomogenan dan keheterogenan sampel
	Mikroskop Imbasan Elektron (<i>Scanning Electron Microscopy, SEM</i>)	Penilaian morfologi dan mikrostruktur
Mikroanalisis	Spektrometri Jisim Ion Sekunder (<i>Secondary Ion Mass Spectrometry, SIMS</i>)	Pencirian kuantitatif dan semi-kuantitatif juzuk-juzuk dalam bahan pukal
	Mikroanalisis sinar-x	Analisis lapisan dan penyalutan

Selain analisis yang menjurus kepada bahan nuklear, kaedah forensik tradisional juga amat penting dalam penyiasatan forensik nuklear. Forensik tradisional dijalankan untuk tujuan pendakwaan dan bermatlamat untuk mengenal pasti individu serta mengaitkan perhubungan antara lokasi kejadian, peristiwa dan individu. Ia adalah berdasarkan prinsip Locard yang menerangkan apabila dua objek bertemu, terdapat pertukaran bahan di antara kedua-duanya (Meyer et al. 2007). Bahan surih yang biasa terlibat dalam pertukaran di tempat kejadian jenayah dan biasa disiasat di makmal forensik adalah cap jari, DNA, fiber, rambut, tanda alat, kaca, tumbuhan, tanah atau cat. Satu kes yang berlaku di Karlsruhe, Jerman pada Februari, 1997, analisis bahan bukan nuklear yang diambil dari tempat kejadian menjadi kunci kepada penemuan asal usul dua logam beradioaktif. Logam tersebut dicemari dengan partikel uranium oksida (uranium diperkaya rendah, LEU dan uranium diperkaya tinggi, HEU) dengan sedikit produk pembelahan. Hasil analisis unsur ke atas logam tersebut menunjukkan ia adalah keluli tahan

karat yang berasal sama ada dari Eropah Timur atau Russia. Dimensi fizikal keluli tahan karat tersebut berpadanan dengan bahagian atas dan tengah bahan api yang digunakan dalam reaktor BN-600 dan reaktor penyelidikan BN-10 buatan Russia (Keegan et al. 2016).

4. Interpretasi Data

Maklumat yang diperolehi hasil daripada analisis forensik nuklear daripada bahan nuklear yang tidak diketahui boleh dibahagikan kepada dua iaitu maklumat endogenik dan eksogenik (Mayer et al. 2007). Maklumat endogenik boleh terus difahami dan kemungkinan hanya memerlukan pengiraan model ringkas bagi membantu interpretasi data. Sebaliknya, bagi maklumat eksogenik data perlu dibandingkan dengan data daripada sampel yang diketahui asal-usulnya. Ketersediaan maklumat rujukan atau perbandingan sampel adalah perlu bagi interpretasi data seperti ketidaktulenan kimia atau komposisi isotopik juzuk minor. Biasanya, interpretasi dijalankan secara berperingkat dan fokus pertama adalah pada tanda pengenalan yang jelas (seperti komposisi isotopik U) dan kemudian diteruskan kepada tanda pengenalan yang lebih halus (seperti unsur surih dan ciri fizik) dan akhir sekali tanda pengenalan kolateral yang ditemui (seperti dalam bungkusan) (Hutcheon et al. 2013).

Cabaran utama dalam interpretasi data adalah kebolehcapaian terhadap data rujukan. Sekiranya terdapat satu pengkalan data yang lengkap mengenai bahan nuklear, pengeluaran, jenis bahan nuklear yang dikeluarkan, komposisi isotopik dan sebagainya ia dapat memudahkan interpretasi data dan seterusnya memudahkan kesimpulan dibuat. Walau bagaimanapun, sesetengah data (seperti ketidaktulenan kimia) adalah sangat sensitif dari segi komersial dan kebolehcapaiannya adalah sangat terhad (Mayer et al. 2007). Data berkaitan bahan nuklear gred senjata nuklear misalnya, adalah mustahil untuk diperolehi kerana ia amat sensitif dan sulit dari segi keselamatan negara dan ia tidak dikongsikan. Untuk itu, program kerjasama serantau dan antarabangsa adalah sangat penting dalam bidang forensik nuklear. Pertukaran maklumat dan data rujukan dapat memudahkan proses interpretasi data dan memudahkan untuk melakukan kesimpulan forensik nuklear.

5. Peranan IAEA dan Negara Ahli

Pihak IAEA menyediakan sokongan kepada negara ahli dalam usaha mengadakan dan memantapkan infrastruktur sekuriti nuklear yang efektif termasuk kapabiliti dalam forensik nuklear. Dalam menyokong negara ahli membangunkan kapabiliti teknikal, IAEA menyediakan:

- i) Bantuan teknikal bagi persediaan menjalankan pemeriksaan forensik nuklear dalam konteks penyiasatan apabila berlaku insiden sekuriti nuklear. Pertimbangan utama termasuk prosedur melibatkan mengumpulan dan pemeliharaan bahan bukti serta aturan penganalisan di makmal bermula dari analisis tanpa musnah ke analisis yang melibatkan pemusnahan sampel.
- ii) Latihan yang meningkatkan kesedaran forensik nuklear dalam menghalang dan kewajaran tindakan apabila berlaku kejadian sekuriti nuklear, melengkapkan pasukan tindakan dalam mengumpulan bahan bukti bagi menyokong penyiasatan forensik

nuklear termasuk membangunkan *chain of custody* dan juga mengarahkan pasukan dengan metodologi forensik nuklear yang terkini.

- iii) Peluang penyertaan dalam projek penyelidikan koordinasi IAEA bersama para penyiasat terbaik bidang forensik nuklear yang secara tidak langsung mempromosikan analisis forensik nuklear dari konteks sains
- iv) Konsultansi dan pandangan saintifik bagi membantu negara ahli dalam pembangunan dan pengukuhan kapabiliti forensik nuklear kebangsaan yang menggunakan fasiliti sediaada dan mengenalpasti pakar bidang (*subject matter expert*) dalam sains nuklear, penguatkuasa undang-undang dan sekutiri nuklear.

Dalam mengiktiraf faedah dan kebaikan kapabiliti forensik nuklear dalam mengimplemintasi infrastruktur sekuriti nuklear peringkat nasional, pertamanya IAEA telah menerbitkan panduan teknikal bidang ini dalam IAEA Nuclear Security Series No. 2, *Nuclear Forensics Support* pada tahun 2006 berdasarkan pendekatan am dalam melaksanakan pemeriksaan forensik nuklear yang dibangunkan oleh Kumpulan Kerja Teknikal Antarabangsa Forensik Nuklear (*Nuclear Forensics International Technical Working Group - ITWG*). Pada tahun 2015, pihak IAEA menerbitkan buku panduan kedua dalam IAEA Nuclear Security Series No. 2-G (Rev. 1), *Nuclear Forensics in Support of Investigations Implementing Guide*.

6. Kesimpulan

Forensik nuklear adalah satu cabang bidang sains baru yang kepentingannya tidak boleh dipertikaikan lagi terutamanya apabila melibatkan perkara berkaitan keselamatan nuklear. Kini, forensik nuklear merupakan alat yang penting bagi mengenal pasti asal usul dan kegunaan bahan nuklear yang ditemui berada diluar kawalan undang-undang. Pendekatan analitikal dan interpretasi daripada data pengukuran forensik nuklear adalah sistematik dan kini, metodologinya semakin matang yang memberikan keputusan yang boleh dipercayai. Justeru, aktiviti pembangunan yang berterusan dan pengukuhan bidang forensik nuklear di peringkat setempat dan antarabangsa adalah penting dalam menghalang aktiviti perdagangan haram bahan nuklear dan seterusnya menghapuskan ancaman pengganas nuklear.

6. Rujukan

- Hutcheon, I., Kristo, M. & Knight, K. 2015. Nonproliferation nuclear forensics. In: Burns 262 PC, Sigmon GE (eds) Uranium: Cradle to Grave. Mineralogical Association of Canada Short 263 Course 43:7-14
- Glasser, A. & Bielefeld, T. 2008. Nuclear forensic, capabilities, limit and the 'CSI effect'. https://www.princeton.edu/~aglaser/talk2008_forensics.pdf. [5 Januari 2008].
- Karpas, Z. 2015. *Analytical chemistry of uranium*. Florida: CRC Press.
- Keegan, E., Kristo, M.J., Toole, K. Kips, R. & Young, E. 2016. Nuclear Forensics: Scientific analysis supporting law enforcement and nuclear security investigations. *Analytical Chemistry*, 88:1496-1505.

- IAEA, 2006. Nuclear forensic support. IAEA Nuclear Security Series No. 2. Vienna. International Atomic Energy Agency.
- IAEA, 2015. Nuclear forensic in support investigation. IAEA Nuclear Security Series No. 2-G (Rev. 1). Vienna. International Atomic Energy Agency.
- Mayer, K., Wallenius, M. & Ray, I. 2005. Nuclear forensics – a methodology providing clues on the origin of illicitly trafficked nuclear materials. *Analyst*, 130: 433-441.
- Mayer, K. Wallenius, M. & Fanghanel, T. 2007. Nuclear forensic science- From cradle to maturity. *Journal of Alloys and Compounds*, 444-445: 50-56.
- Mayer, K. & Wallenius, M. 2009. Nuclear forensic. *Radiochemistry and Nuclear Chemistry*. United Kingdom: EOLSS Publisher Co. Ltd.