



i-NUKLEAR

ILMU . IDEA . INFORMASI

Forensik Nuklear



Sejarah

Sejarah agensi bermula pada 11 November 1971 apabila satu jawatankuasa yang dikenali sebagai Pusat Penyelidikan dan Aplikasi Tenaga Nuklear (CRANE) ditubuhkan, bagi mengkaji kemungkinan Malaysia menceburi bidang teknologi nuklear. Usul ini telah diterima dan diluluskan dalam mesyuarat Jemaah Menteri pada 19 September 1972 yang menyokong cadangan terhadap keperluan Malaysia menubuhkan pusat penggunaan dan penyelidikan teknologi nuklear. Pada Ogos 1973, Jawatankuasa Perancangan Pembangunan Negara mencadangkan untuk menamakan pusat ini sebagai Pusat Penyelidikan Atom Tun Ismail (PUSPATI) dan telah diiktiraf sebagai pusat kebangsaan.

PUSPATI telah diletakkan di bawah Kementerian Sains, Teknologi dan Alam Sekitar (MOSTE). Tahun 1983 merupakan detik penting bagi agensi apabila diberikan identiti baru iaitu Unit Tenaga Nuklear (UTN). Serentak dengan itu, UTN telah dipindahkan dari MOSTE ke Jabatan Perdana Menteri (JPM). Ini memberi impak yang besar kepada peranan agensi kerana buat pertama kalinya aktiviti nuklear yang melibatkan perancangan polisi negara dan kegiatan operasi nuklear disatukan di bawah naungan JPM. Namun pada 27 Oktober 1990, UTN telah dipindahkan semula ke MOSTE. Jemaah Menteri

dalam mesyuaratnya pada 10 Ogos 1994, telah meluluskan pertukaran nama UTN kepada Institut Penyelidikan Teknologi Nuklear Malaysia (MINT).

Logo baru juga telah diperkenalkan pada 22 Oktober 2009 ketika Hari Pelanggan MINT, yang juga julung kali diadakan. Bagi memberi arah hala yang lebih jelas, isi MINT diperkemas kepada mempertingkatkan pembangunan dan daya saing ekonomi negara melalui kecemerlangan dalam teknologi nuklear. Pada 13 April 2005 sekali lagi agensi mengalami perubahan entiti apabila digazet dengan nama baru iaitu Agensi Nuklear Malaysia (Nuklear Malaysia). Kini Nuklear Malaysia terus melebarkan sayap dalam mengembangkan R, D & C bagi menyokong aspirasi negara.

Peranan

Nuklear Malaysia adalah sebuah agensi di bawah Kementerian Tenaga, Sains, Teknologi, Alam Sekitar & Perubahan Iklim (MESTECC). Nuklear Malaysia juga adalah agensi peneraju penyelidikan dan pembangunan (R&D) sains dan teknologi nuklear bagi pembangunan sosioekonomi negara. Semenjak penubuhannya, Nuklear Malaysia telah diamanahkan dengan tanggungjawab untuk memperkenalkan dan mempromosi sains dan teknologi nuklear kepada masyarakat, sekaligus menyemai minat dan menyedarkan orang awam akan kepentingan teknologi nuklear dalam kehidupan. Hingga ke hari ini, Nuklear Malaysia kekal penting sebagai sebuah organisasi yang mantap dalam bidang saintifik, teknologi dan inovasi.

Pencapaian cemerlang Nuklear Malaysia adalah bersandarkan pengalaman 47 tahun dalam pelbagai pembangunan S&T nuklear, serta 37 tahun dalam pengendalian reaktor penyelidikan yang bebas kemalangan radiologi dan bersih alam sekitar. Selain itu, hasil R&D yang berpotensi turut diketengahkan ke pasaran sebagai usaha memanfaatkan penemuan inovasi saintifik kepada rakyat dan ekonomi Malaysia. Nuklear Malaysia juga sentiasa memastikan perkhidmatan yang diberikan adalah berkualiti dan bertaraf antarabangsa dalam kelasnya. Kemampuan ini adalah berdasarkan latihan dan disiplin tenaga kerja profesional, infrastruktur, kejuruteraan serta makmal penyelidikan yang lengkap.

Posisi Nuklear Malaysia sebagai pusat penyelidikan unggul telah diiktiraf dan dicontohi oleh agensi-agensi nuklear dari negara-negara jiran, malahan dijadikan model dalam merangka pelan pelaksanaan pembangunan S&T nuklear masing-masing, terutamanya aspek pemindahan dan pengkomersilan teknologi.

PENAUNG

Dr. Mohd. Abd. Wahab bin Yusof

EDITOR KANAN

Habibah binti Adnan

EDITOR

Normazlin binti Ismail

PENYELARAS

Wan Jazlina binti Wan Ahmat

PENULIS

Dr. Zalina binti Laili
Shamsiah binti Abdul Rahman
Dr. Mohd Yusof bin Hamzah
Dr. Zainon binti Othman
Roslanzairi bin Mostapa
Nazaratul Ashifa binti Abdullah Salim

PEREKA GRAFIK

Norhidayah binti Jait

JURUFOTO

Nor Hasimah binti Hashim

DITERBITKAN OLEH:

Unit Penerbitan
Bahagian Pengurusan Maklumat
Agensi Nuklear Malaysia
Bangi, 43000 Kajang,
Selangor Darul Ehsan.

editorial

hak cipta terpelihara

Mana-mana bahagian penerbitan ini tidak boleh dikeluarkan ulang, disimpan dalam sistem dapat kembali, atau disiarkan dalam apa-apa jua cara, sama ada secara elektronik, fotokopi, mekanik, rakaman atau lain-lain, sebelum mendapat izin bertulis daripada Penerbit. Sidang Editor berhak melakukan penyuntingan ke atas tulisan yang diterima selagi tidak mengubah isinya. Karya yang disiarkan tidak semestinya mencerminkan pendapat dan pendirian Agensi Nuklear Malaysia.

isi kandungan i-NUKLEAR

2 Tinta Ketua Pengarah & Dari Meja Editor

3-6 Forensik Nuklear: Penyiasatan dalam Konteks Sekuriti Nuklear

7-9 Teknologi Nuklear dalam Sains Forensik

10-15 Forensik Makanan: Peranan Teknik Nuklear dalam Forensik Makanan

16-19 Kepakaran Nuklear Malaysia : Pengkategorian dan Pencirian Bahan – Elemen Penting dalam Forensik Nuklear

20-23 Penilaian Data Saintifik Pencemaran Udara Kawasan Lembah Klang, Kuala Lumpur

24-26 Teknik Analisis dalam Forensik Nuklear

27-31 Penggunaan Teknologi Nuklear di dalam Penyiasatan Pencemaran Sumber Air

32-35 Memahami Elemen Utama dalam Sekuriti Nuklear

t i n t a

ketua pengarah

Forensik nuklear adalah satu cabang sains forensik yang relatifnya masih baharu di Malaysia. Penggunaan istilah forensik nuklear pertama kali digunakan pada pertengahan tahun 1990-an. Sejak itu, bidang ini mula dibangunkan secara serius di peringkat antarabangsa dan merupakan elemen penting di dalam sekuriti nuklear.

Forensik nuklear bukan sahaja menentukan ciri bahan, namun turut menentukan tujuan penggunaan dan asalan bahan yang berpotensi terlibat dalam penyeludupan. Ia menyokong ke arah pencegahan dan memberi tindak balas terhadap sesuatu insiden yang berkaitan dengan keselamatan negara. Perkara ini disebabkan forensik nuklear merupakan salah satu elemen penting dalam pelan tindakan bagi sesuatu insiden yang berkaitan dengan keselamatan nuklear yang mengikut prosedur bukan sahaja untuk menentukan kuantiti bahan diperlukan malah menterjemah data mengikut informasi dan pengetahuan dalam kitaran operasi bahan nuklear.

Dr. Mohd. Abd. Wahab bin Yusof

Ketua Pengarah
Agensi Nuklear Malaysia



d a r i

meja editor

Teknologi nuklear dalam forensik masih baharu diperkenalkan. Promosi aplikasi teknik nuklear, kepakaran dan kemudahan sains forensik oleh Nuklear Malaysia merupakan satu kelebihan yang sangat penting. Selain itu, usaha-usaha berterusan seperti seminar, bengkel dan penulisan oleh penyelidikan akan mewujudkan satu rangkaian kerjasama dan peningkatan pemahaman mengenai nuklear forensik di Malaysia.

Habibah binti Adnan

Pengarah
Bahagian Pengurusan Maklumat



Forensik Nuklear:

Penyiasatan dalam Konteks Sekuriti Nuklear

*Dr. Zalina binti Laili, Shamsiah binti Abdul Rahman
& Nazaratul Ashifa binti Abdullah Salim*

Forensik nuklear merupakan satu cabang ilmu baru dalam bidang sains. Jika sains forensik dikaitkan dengan pemeriksaan spesimen atau bukti jenayah di dalam sesuatu kes jenayah, forensik nuklear pula lebih fokus kepada penyiasatan yang berkaitan dengan bahan radioaktif. Tujuan utama forensik nuklear adalah untuk mengenal pasti asal usul dan tujuan penggunaan sesuatu bahan radioaktif terutama dalam kes penyeludupan bahan nuklear, aktiviti perdagangan haram bahan nuklear atau akibat daripada kes letupan nuklear. Dengan teknik ini, penguatkuasaan undang-undang dapat dilaksanakan dengan lebih cekap dan tegas.

Secara umum, terdapatnya bidang forensik nuklear adalah berkait rapat dengan kejatuhan Kesatuan Soviet pada awal 1990-an (Mayer et al. 2007). Kejatuhan ini telah memulakan aktiviti penyeludupan nuklear yang boleh mengancam keselamatan dunia apabila kegiatan ini dikaitkan dengan aktiviti keganasan. Kes penyeludupan nuklear yang pertama dilaporkan pada 1991 di Itali dan Switzerland. Agensi Tenaga Atom Antarabangsa (IAEA) telah merekodkan lebih daripada 3235 insiden penyeludupan bahan nuklear atau radioaktif berlaku antara tahun 1993 sehingga tahun 2018 (IAEA 2018).

Forensik nuklear secara teknikal merujuk kepada satu analisis untuk menentukan sifat fizik, kimia, unsur dan isotop bahan nuklear bagi membantu menentukan umur, asal-usul dan sejarah bahan nuklear atau radioaktif yang ditemui di luar kawalan undang-undang (Hutcheon et al. 2005).



Tanda pengenalan nuklear (*nuclear signatures*) pada bahanradioaktif boleh menjawab persoalan;

1. Adakah pelanggaran undang-undang yang berlaku?
2. Apakah bahan-bahan yang terlibat?
3. Siapa yang bertanggungjawab?
4. Bagaimana, bila dan di mana bahan tersebut dibuat?
5. Apakah tujuan penggunaannya?



Forensik nuklear bidang sains baru yang diwujudkan bagi penyiasatan bahan radioaktif yang ditemui berada di luar kawalan undang-undang.

Oleh itu, ahli forensik nuklear berperanan menyediakan data saintifik kepada pihak penguatkuasa undang-undang dan menterjemahkan data tersebut berserta interpretasi teknikal mereka dengan jelas dan bermakna supaya data ini boleh dijadikan sebagai bukti pendakwaan di mahkamah.

Matlamat utama forensik nuklear untuk mengenal pasti pihak yang terlibat dalam aktiviti mencuri bahan nuklear atau pengganas nuklear. 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. Bahan ini berisiko disalahgunakan untuk membuat bom kotor (*dirty bom*) atau peranti letupan (*Radiological Dispersal Device, RDD*).

Di sinilah forensik nuklear memainkan peranan untuk mengenal pasti pihak yang terlibat yang dapat memberikan jawapan. Secara tidak langsung kecurian bahan radioaktif dapat dihalang dan aktiviti keganasan penggunaan nuklear dapat disekat. Ini sekali gus dapat mempertingkatkan perlindungan dan pengawalan bahan radioaktif dan senjata nuklear.

Hasil data penyiasatan sifat fizik, kimia, unsur dan isotop bagi bahan radioaktif akan dihipunk untuk membentuk satu pangkalan data yang dikenali sebagai perpustakaan forensik nuklear (*Nuclear Forensics Library, NFL*)

NFL menyimpan maklumat jenis bahan nuklear, nombor siri, negara buatan, saiz yang memudahkan proses penyiasatan sekiranya bahan radioaktif ditemui di luar kawalan undang-undang.

Proses penyiasatan forensik nuklear bermula apabila sesuatu bahan dirampas dan dikategorikan sebagai bahan nuklear. Sampel dikumpulkan daripada tapak, disaringkan bagi menentukan sama ada ia beradioaktif atau tidak. Kemudian, sifat fizik, kimia dan isotop ditentukan melalui forensik nuklear dan forensik tradisional. Akhir sekali kesimpulan akan dibuat berkaitan asal usul bahan radioaktif dan mengenal pasti pihak yang bertanggungjawab. Keseluruhan proses analisis forensik nuklear digambarkan dalam Rajah 1.

PERSAMPELAN

PENYARINGAN

**ANALISIS:
FIZIK, KIMIA & ISOTOP**

**FORENSIK NUKLEAR
& FORENSIK TRADISIONAL**

**KESIMPULAN
FORENSIK NUKLEAR**

Rajah 1 Proses yang Terlibat Dalam Analisis Forensik Nuklear

Penyiasatan forensik nuklear secara amnya menjurus kepada maklumat yang dibawa oleh bahan nuklear atau radioaktif tersebut. Bahan nuklear dikeluarkan sama ada daripada proses perlombongan uranium atau proses tangkapan neutron (dalam reaktor). Proses-proses yang dilalui semasa pengeluaran bahan nuklear ini akan menentukan komposisi unsur, isotop, mikroskopik dan makroskopik bahan tersebut. Kesemua parameter tersebut boleh diukur menggunakan teknik analitikal tertentu. Sesetengah parameter pula boleh digabungkan dan dikenali sebagai cap jari nuklear yang menggambarkan mod pengeluaran bahan tersebut. Selain daripada itu, istilah tanda pengenalan nuklear juga digunakan dalam kajian forensik nuklear. Ia menggambarkan ciri-ciri bahan nuklear seperti isotop, kelimpahan, kepekatan unsur, bentuk fizik dan kimia dan dimensi fizikal yang dapat digunakan untuk mengaitkan bahan tersebut kepada individu, lokasi dan proses yang dijalankan (Keegan et al. 2016). Hal ini kerana di setiap proses pengeluaran bahan nuklear atau radioaktif, ciri isotop, kimia dan fizik atau tanda pengenalan unik akan dibentuk. Justeru, pengukuran sampel daripada 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 4 g 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 silinder yang juga terdapat satu ampul kaca

yang mengandungi 500 g serbuk hitam halus. Persamaan pada bekas plumbum berbentuk silinder 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-dua bahan tersebut. Persamaan pada komposisi isotop uranium daripada kedua-dua kes mencadangkan bahawa ia berasal daripada sumber yang sama (negara, fasiliti dan proses) (Keegan et al. 2016). Bukti-bukti seumpama ini adalah penting dalam mengenalpasti pihak yang terlibat. Seterusnya, memudahkan proses tangkapan dan pendakwaan dijalankan.



Penyiasatan forensik nuklear membantu mengenal pasti asal usul dan sejarah bahan nuklear atau radioaktif yang ditemui diluar kawalan undang-undang

Bahan radioaktif secara amnya adalah dikawal 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 termasuklah penekanan terhadap cara 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 mengamalkan forensik nuklear dalam menjalankan penyiasatan. Kerjasama erat di antara penguatkuasa undang-undang, pasukan perkhidmatan perlindungan sinaran, pakar forensik dan pakar analisis forensik nuklear adalah sangat penting dalam menjamin kelancaran proses penyiasatan forensik nuklear. Seiring dengan perkembangan bidang sains baharu yang mempunyai kepentingan yang tidak boleh dinafikan lagi terutamanya apabila melibatkan perkara berkaitan sekuriti nuklear. 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.

Teknologi Nuklear dalam Sains Forensik

Dr. Mohd Yusof bin Hamzah

Penggunaan teknologi termaju aplikasi nuklear di samping teknik konvensional sangat berguna bagi mengesahkan bukti yang diperlukan untuk mendakwa pesalah jenayah. Antara teknologi nuklear yang digunakan dalam sains forensik adalah:

Analisa Pengaktifan Neutron (NAA)

Makmal Analisa Pengaktifan Neutron (NAA) mampu menganalisa persamaan unsur-unsur dalam peledakan bahan letupan peluru dengan senjata api yang telah digunakan. Selain daripada analisa sampel makanan, NAA juga boleh menganalisa serpihan peluru dan baki ledakan daripada senjata api, sampel rambut, kuku dan unsur dalam letupan bom bagi menentukan punca letupan.

NAA juga dapat membantu pihak berwajib dalam menentukan kawasan yang mungkin mengalami pencemaran akibat kemajuan bandar dan industri yang boleh memudaratkan hidupan jika tidak dikawal. Kajian pencemaran alam sekitar, partikel udara, sungai dan air laut dilakukan melalui analisa pengaktifan neutron pada sampel-sampel yang diambil dari kawasan kajian.

Gebeng di Pahang, Talang-Satang dan Bako National Park di Sarawak, Manjung di Perak, The Tunku Abdul Rahman National Park di Sabah dan di Lembah Klang. Analisa data menunjukkan kepekatan tinggi hanya untuk unsur Fe berbanding unsur lain dan tiada kes keracunan.

Makmal NAA juga banyak menerima sampel daripada Jabatan Kimia Malaysia, Jabatan Muzium Malaysia, Agensi Alam Sekitar dan industri bagi membantu menganalisa unsur kajian kes-kes yang terlibat.



Makmal Analisis Pengaktifan Neutron di Nuklear Malaysia

Radar Penembusan Tanah (GPR)

Salah satu penggunaan teknologi yang paling inovatif dalam penguatkuasaan undang-undang hari ini ialah radar penembusan tanah (GPR), yang menggunakan teknologi ujian tanpa musnah (NDT) untuk penyiasatan tapak dan mengecam lokasi objek yang tertanam sehingga hampir lima meter ke dalam tanah. Teknik ini dapat membantu pihak penguatkuasa undang-undang dalam mencari bukti pelbagai kes.

Teknik ini telah berjaya mencari bukti terkubur (*buried evidence*), kuburan yang tidak ditandakan (*unmarked graves*) termasuk kes pengesanan kedudukan mayat di tanah perkuburan. Radar penembusan tanah telah membantu kes kehilangan manusia dan menjumpai kedudukan kuburan yang menjadi mangsa pembunuhan dalam hutan yang sukar ditemui sehingga penjenayah dapat didakwa.



Operasi Te Auraki 2018 kerjasama dengan ATM



Liputan akhbar mengenai radar penembusan tanah (Ground Penetrating Radar GPR) di Utusan Malaysia 2017



Operasi Reunite 2016 kerjasama dengan ATM

Analisis Ketulenan Emas: Teknik Sinar-X Pendaflour (XRF)

Penggunaan teknik pencirian moden amat penting bagi menangani masalah pemalsuan terutamanya barang kemas dan barangan yang sangat berharga bagi membezakan keasliannya.

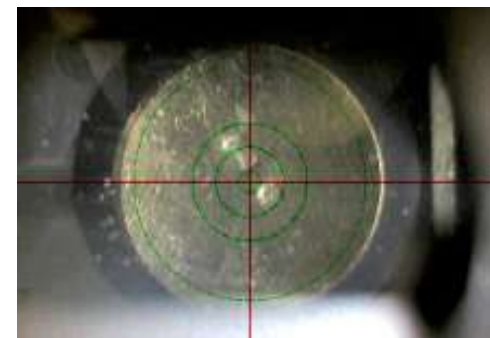
XRF digunakan bagi memastikan tiada unsur penipuan terutamanya unsur tungsten yang boleh mewujudkan suasana urus niaga yang tidak sihat.

Ketumpatan emas dan tungsten adalah hampir sama. Teknik ini menghasilkan keputusan dengan lebih cepat dan mudah tanpa merosakkan keadaan asal sampel berbanding dengan teknik penggunaan asid. Hasil data yang diperolehi juga disahkan menerusi keputusan ujian ketumpatan dengan densimeter yang biasa digunakan masa kini. Keyakinan terhadap interpretasi keputusan analisa emas dengan XRF adalah tinggi kerana hasil yang diperolehi ditentusahkan (validated) dengan menggunakan bahan rujukan yang disahkan (certified) dan pengendali ujian adalah berkecualan, terlatih dan kompeten terhadap

analisis berkenaan. Sampel piawai dari emas 999, emas 950, emas 916, emas 835 dan emas 750 dijadikan sebagai rujukan bagi menentukan ketulenan emas. Dengan menggunakan teknik ini juga, penentuan ketulenan emas boleh dijalankan pada sebarang kawasan yang diingini.

Analytical Results

Element	Result	Unit	3σ
Au	86.657	%	0.165
Si	12.056	%	0.563
Fe	0.434	%	0.013
K	0.362	%	0.021
Sm	0.194	%	0.035
Ir	0.114	%	0.012
Mn	0.094	%	0.012
Cr	0.069	%	0.013
Ag	0.019	%	0.001



Keputusan analisis XRF bagi sampel piawai emas 835 diperolehi beserta dengan imej kawasan yang dianalisa.

Tentumur Termoluminesen (TLD)

Penentuan umur bahan atau kajian masa sesuatu bahan dapat diproses dan dikesan melalui pengesan TLD foton yang terbebas semasa proses kejadian. Pembebasan elektron teruja akibat sinar mengion yang terdedah pada bahan kajian dapat menentukan usia bahan tersebut.

Prinsip tentumur termoluminesen adalah berdasarkan kepada dos radiasi terkumpul bahan kristal yang telah dipanaskan pada masa lalu seperti proses pembuatan tembikar dengan pemanasan tanah liat. Pendedahan bahan kristal kepada radiasi alam sekitar selama beberapa dekad menyebabkan elektron di dalam bahan tersebut teruja dan menyimpan dos radiasi

Pemanasan semula bahan tersebut di dalam makmal mengembalikan elektron ke jalur valensi dan membebaskan foton. Kadar foton yang dikeluarkan semasa pemanasan di makmal dan pengukuran kadar dos sinaran latar belakang boleh digunakan untuk kaedah tentumur contohnya bagi artifak seramik. Kaedah ini dapat digunakan untuk menentukan umur bahan walaupun berusia 300 hingga 100,000 tahun lalu.



Peralatan Tentumur Termoluminesen

Mikro-CT

Menggunakan sinar-X bagi menghasilkan keratan rentas objek yang menghasilkan model 3D tanpa merosakkan barang asal. Kegunaan Mikro-CT adalah dalam pengimejan perubatan dan industri terutamanya untuk menilai sampel bahan bio, elektronik, tulang, gigi, analisa kegagalan loji industri dan mikrostruktur. MikroCT digunakan bagi menganggarkan umur berdasarkan struktur tulang dan gigi. Pemeriksaan dengan mikroCT adalah pantas, mudah dan tidak merosakkan.

Spektroskopi Sudut Kecil Sinar-X (SAXS)

Nuklear Malaysia juga telah membangunkan teknik Spektroskopi Sudut Kecil Sinar-X (SAXS) untuk kajian forensik. Teknik ini dapat mengkaji struktur nano terutama untuk mendapatkan informasi sampel biologi seperti antibodi, virus dan kuman yang terlibat dalam sesuatu kes forensik.

Peralatan SAXS

Selain daripada itu, Nuklear Malaysia juga telah membangunkan prosedur validasi bagi menentukan kandungan sinar-alpha dan sinar beta dalam air minuman dan mineral yang dibotolkan di pasaran menggunakan sistem pembilang alpha/beta.



Forensik Makanan:

Peranan Teknik Nuklear dalam Forensik Makanan

Dr. Zainon binti Othman



Forensik makanan boleh ditakrifkan sebagai aplikasi prinsip dan teknik-teknik saintifik secara sistematik dalam siasatan bagi menentukan punca sesuatu kualiti makanan terjejas serta mengancam keselamatan pengguna akibat amalan penipuan semasa pengendaliannya. Lazimnya siasatan forensik makanan melibatkan penentuan kebolehkesanan asalan geografi (*origin traceability*) dan ciri autentik sesuatu produk yang mana berkait rapat dengan jaminan makanan berkualiti. Tujuan siasatan adalah untuk mendapatkan keadilan dan penyelesaian kes jenayah melibatkan produk makanan serta ketidakpatuhan peraturan yang memberi kesan negatif kepada keselamatan pengguna, reputasi produk dan industri serta keperluan perundangan. Contoh forensik makanan adalah pengesanan dan jejukan arsenik dalam produk beras daripada sumber asal pengeluaran.

Food Fraud merujuk kepada aktiviti penggantian (*substitution*), penambahan (*addition*), *tampering* atau *misrepresentation* bahan makanan secara sengaja untuk keuntungan ekonomi (USAGlobal Food Safety Initiative). Ini juga termasuk maklumat palsu atau kekeliruan pada pembungkus tentang komposisi, kualiti, asalan geografi dan proses pengeluaran makanan.

Peningkatan mendadak jumlah dagangan global dan rantai bekalan makanan yang kompleks menyebabkan forensik makanan semakin penting. Senario ini telah menimbulkan banyak isu berkaitan kebolehkesanan, ketulenan (autentik) dan keselamatan makanan. Komoditi yang bernilai tinggi pula sering terdedah kepada amalan penipuan (*food fraud*). Dilaporkan *food fraud* menyebabkan kerugian anggaran USD49 billion setahun kepada industri makanan peringkat global manakala UK Food Standards Agency melaporkan berlaku *food fraud* pada 10% makanan di pasaran.

Skandal 'Horsegate' pada tahun 2013 melibatkan penjualan daging lembu yang dikesan mengandungi daging kuda yang tidak diisytihar.

Konspirasi Penipuan Madu (*honey laundering*) merupakan kes penipuan terbesar di USA di mana madu dari China dipasarkan di USA menerusi pelbagai negara setelah dibungkus dan pemalsuan maklumat bagi membersihkan kaitan dengan negara asal.

food fraud tempatan yang dilaporkan di media termasuk penjualan stevia palsu, madu sintetik, beras plastik. Nilai *food fraud* untuk negara Malaysia sukar diperolehi kerana sukar dikesan atau tiada rekod jelas.

Kesan *food fraud* boleh mendatangkan risiko kesihatan yang serius apabila sumber penipuan tidak diketahui dengan cepat. Skandal susu rumusan bayi yang dicemari bahan toksik melamin di China pada 2008 mengakibatkan kematian enam bayi dan membahayakan ratusan ribu bayi merupakan contoh kesan *food fraud* yang memberi mudarat kepada pengguna. Walaupun kebanyakan kes penipuan ini tidak membahayakan kesihatan pengguna, namun ia tetap menyalahi peraturan dan mengakibatkan penurunan kepercayaan pengguna, kerugian ekonomi dan merosakkan jenama produk.

Lazimnya apabila berlaku ancaman pada keselamatan makanan seperti bahan mentah tercemar atau penipuan (*adulteration*), soalan pertama adalah dari mana sumber asal usul makanan tersebut kerana ia berkait rapat dengan makanan autentik. Pengguna juga semakin peka dan mengambil berat tentang asal usul makanan mereka dan sanggup membayar harga lebih tinggi apabila mereka yakin dengan asalan geografi makanan tersebut.

Terdapat banyak negara Eropah kini melindungi produk makanan mereka yang berkualiti atau mempunyai reputasi tinggi menerusi peraturan jaminan kualiti seperti *Protected Designation of Origin* (PDO) dan *Protected Geographical Indications* (PGI). Produk yang dilabel PDO atau PGI mendapat permintaan tinggi dan harga pasaran lebih mahal.

Senarai makanan yang didaftarkan meningkat setiap tahun dan mencecah 1328 jenis pada Mac 2019, antaranya keju Itali dan France, minyak zaiton, daging, jus buah, ubi kentang, susu dan lain-lain

Keperluan sistem kebolehesanan makanan

Keperluan untuk kaedah pengawalan dan verifikasi keselamatan makanan dibuktikan dengan peningkatan senarai makanan yang ditarik balik dari pasaran dan insiden *food fraud*. Sistem kebolehesanan konvensional dapat mengesan sumber makanan di sepanjang bekalan rantai, namun terdapat kepincangan signifikan. Lazimnya produk makanan dikenal pasti menerusi dokumen pelabelan *barcode* atau secara elektronik seperti tag RFID pada pembungkus. Ini bererti sistem mengesan pembungkus berdasarkan maklumat yang terdapat pada label dan bukan ciri produk itu. Isu akan timbul apabila produk terpisah daripada pembungkus dalam rantai bekalan. Insiden wabak keracunan makanan akibat bakteria pencemar *Salmonella* pada buah tomato dan cili capsicum berasal dari Mexico dan berlaku di USA membuktikan sistem kebolehesanan berasaskan dokumen kurang berkesan.

Bagi menangani isu keselamatan makanan di Malaysia, Peraturan Makanan Bersih (2009) mempunyai peruntukan untuk kebolehesanan, namun mekanisma tidak dinyatakan. Mekanisma sedia ada kebanyakannya berdasarkan sistem kertas/rekod yang memberi maklumat bersama komoditi. Walau bagaimanapun, sistem ini terdedah kepada kegagalan secara tidak sengaja seperti kesilapan semasa memasukkan data atau disengajakan, iaitu penipuan maklumat.

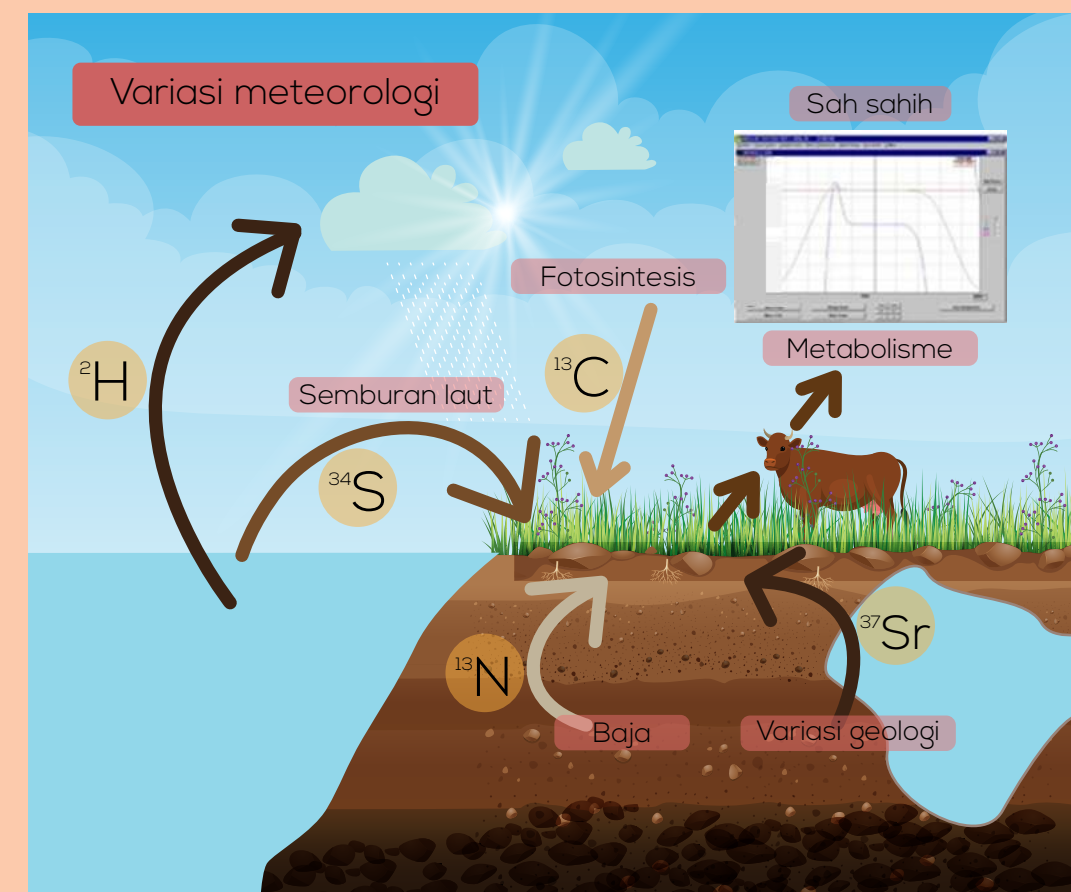
Oleh itu, terdapat keperluan untuk membangunkan teknik saintifik untuk mengukuhkan sistem kebolehesanan makanan. Ini penting bagi menjamin makanan berkualiti dan selamat dan serta mengesahkan makanan autentik (tulen) dan mengawal amalan penipuan.

Teknik nuklear sebagai alat forensik makanan

Food fraud sukar dikesan secara visual luaran atau menggunakan teknik analisis kimia konvensional kerana teknik penipuan semakin sofistikated. Namun, pembangunan alat saintifik yang sensitif dan tepat telah berjaya mengesan penipuan ini.

Teknik nuklear melibatkan pencapjarian isotop stabil merupakan antara teknik penting dalam forensik makanan. Isotop adalah atom-atom sesuatu unsur yang mempunyai bilangan proton sama tetapi berbeza bilangan neutron, oleh itu berbeza berat. Kebanyakan unsur menunjukkan keisotopan, iaitu mempunyai lebih dari satu jenis isotop. Isotop stabil ialah isotop unsur kimia yang tidak radioaktif, iaitu ia tidak menjalani pereputan radioaktif secara spontan.

Penentuan asalan geografi makanan adalah berasaskan pengukuran nisbah isotop stabil dalam produk sebagai petunjuk geografi. Isotop stabil seperti karbon, nitrogen, oksigen, hidrogen dan sulphur, yang hadir semulajadi di persekitaran diserap oleh produk menerusi air, tanah dan tanaman. Tahap kandungan diserap berbeza kerana dipengaruhi faktor geografi atau persekitaran di mana produk dihasilkan. Nisbah isotop hidrogen $^2\text{H}/^1\text{H}$ dan oksigen $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ lazimnya dikaitkan dengan iklim tempat seperti suhu dan latitud manakala isotop nitrogen $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ dan karbon $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ bergantung kepada amalan pertanian serta diet haiwan. Berdasarkan perbezaan ini, pencapjarian unik yang mengaitkan produk ke tempat asal dapat dihasilkan. Analisis *chemometric* digunakan untuk menjana model statistik yang dapat mendiskrimasi produk mengikut asalan geografi. Sistem saintifik ini terbukti berkesan untuk menentusahkan produk dari asalan geografi berbeza dan makanan autentik. Ini penting dalam menangani '*fraud*' dan memastikan keselamatan dan kualiti makanan, perlindungan pengguna dan dagangan antarabangsa.



Pencapjarian isotop stabil lazimnya digabungkan dengan kandungan unsur surih bagi membantu pengesanan dan pengesahan ketulenan produk. Nisbah isotop stabil dianalisis menggunakan spektrometri jisim nisbah isotop (IRMS). Kandungan unsur pula ditentukan melalui kaedah spektrometri jisim plasma gandingan aruhan (ICPMS) atau analisis pengaktifan neutron (NAA).

Kelebihan teknik ini adalah kebolehesanan berasaskan ciri dalaman produk sendiri yang dianalisis secara saintifik dengan tepat. Pencapjarian ini tidak boleh dipalsukan. Ini berbeza dengan sistem tradisional yang mengesan produk berdasarkan kenyataan label pada pembungkusan. Ketepatan maklumat bergantung kepada kenyataan di label dan apabila label / pembungkus terpisah dari produk, kebolehesanan akan terjejas.

Aplikasi

Analisis isotop stabil telah diiktiraf oleh EU, CEN dan AOAC sebagai kaedah rasmi untuk mengesan penipuan dalam wain, madu, jus buah, sejak 1990an. Gabungan perbezaan profil isotop stabil dan mineral/unsur surih (trace element) berkesan menentukan asal usul produk makanan seperti minyak zaiton, madu, buah, daging, makanan laut, teh, kopi dan produk tenusu dari pelbagai negara. Begitu juga beras *long grain* dari USA, Eropah, India dan Pakistan dapat dibezakan menerusi nilai unsur *boron* serta *magnesium* dan komposisi isotop oksigen. Pencapjarian isotop juga digunakan sebagai petunjuk untuk mengesahkan makanan organik seperti sayuran atau makanan laut liar berbanding bela disangkar seperti ikan.

SI in determining adulterated food		
Product	Adulteration	Analysis
Fruit juices	Watering	(D.H) and ^{18}O -IRMS
Fruit juices	Sweetening with inverted beet & cane sugars	^{13}C -IRMS and SNIF-NMR
Honey, maple syrup	Addition of inverted and cane sugars	^{13}C -IRMS
Aromas, flavours (vanillin, raspberry ketone, ...)	Mislabelling (artificial ↔ natural)	^{13}C -IRMS, ^{18}O -IRMS, SNIF-NMR
Alcoholic beverages	Mislabelling (geographical and botanical origins)	^{13}C -IRMS, ^{18}O -IRMS, SNIF-NMR, H_2 and ^{18}O -pyr-IRMS
Wines	Watering	(D.H) and ^{18}O IRMS
Wines	Chaptalisation (addition of sugars)	^{13}C -IRMS, SNIF-NMR
Olive oils	Addition of cheaper oils	^{18}O -IRMS
Dairy products	Addition of undeclared milk, mislabelling (geographical origin)	^{13}C - and ^{15}N -IRMS
Meat (beef, lamb, ...)	Mislabelling (geographical origin) and feeding diet	^{18}O -IRMS and H_2 , H_2 and ^{13}C -NMR
Fish meat	Mislabelling (wild ↔ farmed)	Multi-isotope profiling

Aplikasi isotop stabil untuk penentuan makanan 'adulterated'

Penyelidikan di Malaysia

Inisiatif awal membangunan sistem kebolehesanan makanan ialah melalui penglibatan Nuklear Malaysia dalam program serantau International Atomic Energy Agency (IAEA) iaitu 'Building Technological Capability for Food Traceability and Food Safety Control System Through the Use of Nuclear Analytical Techniques (RAS5062) bermula 2013 hingga 2015. Komoditi beras telah digunakan sebagai model. Penyelidikan berkaitan sistem jejak sarang burung walit (SBW) berasaskan pencapjarian kimia (isotop stabil, unsur surih dan metabolit) dimulakan pada 2016 menerusi projek 'Strengthening National Technical Capability in Food Traceability of Edible Bird's Nest through Application of Nuclear and Related Technologies' (MAL5030) dengan kerjasama empat agensi lain, iaitu Kementerian Kesihatan Malaysia (KKM), Jabatan Khidmat Veterinar (DVS), Jabatan Kimia Malaysia (Kimia) dan Universiti Sains Malaysia (USM) dan IAEA.

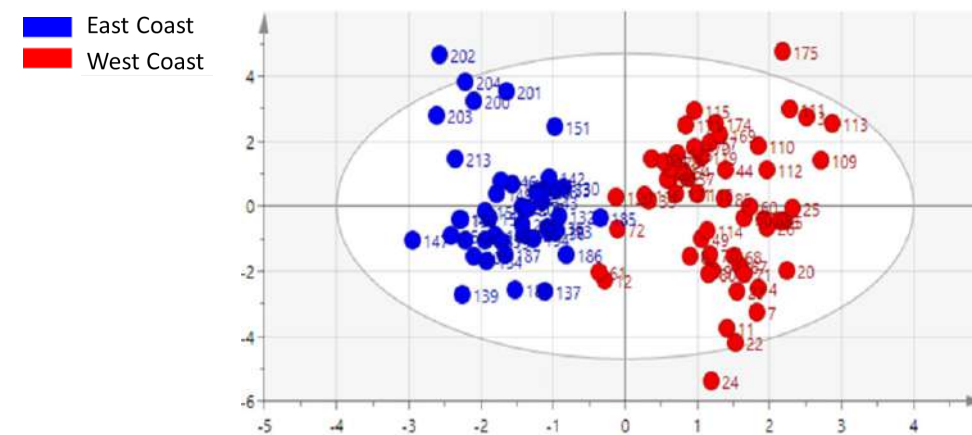
Industri sarang burung walit global merupakan industri bernilai tinggi, dianggarkan bernilai RM10.2 billion setiap tahun.

Selain Indonesia dan Vietnam, Malaysia antara pengeluar utama dengan anggaran jualan sebanyak RM1.5 billion dan dijangka meningkat ke RM 4 billion pada 2020.

Makanan kesihatan premium ini turut menghadapi masalah daripada segi pemalsuan produk, penipuan pelabelan dan ketulenan kerana nilainya yang amat tinggi dan bekalan yang terhad. China sebagai pasaran utama eksport, pernah melaporkan terdapat 60% produk sarang burung walit tidak autentik di pasaran tetapi tidak diketahui negara asal.

Sistem kebolehesanan sedia ada kebanyakan berasaskan maklumat pada label, tag RFID dan kod QR, namun mekanisma ini terdedah kepada pemalsuan maklumat oleh pihak pengusaha sarang burung walit. Oleh itu, terdapat keperluan untuk membangunkan satu teknik saintifik bagi menyokong program kawalan keselamatan dan kualiti industri SBW Malaysia.

Penghasilan cap jari yang unik berjaya dibangunkan untuk membezakan asal-usul dan ketulenan sarang burung walit. Beberapa model asalan geografi sarang telah dijana menggunakan analisis statistik *chemometric*. Sistem saintifik ini penting untuk menjamin keselamatan dan ketulenan produk, meningkatkan nilai pasaran produk serta menangani amalan penipuan.



Model mendiskriminasi asalan geografi SBW antara sampel pantai timur dan barat

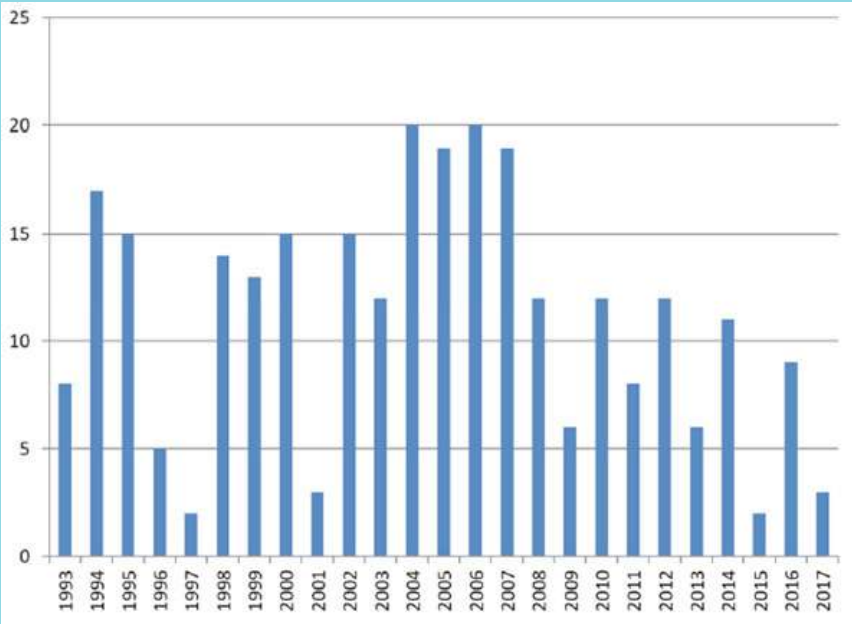
Kepakaran Nuklear Malaysia : Pengkategorian dan Pencirian Bahan – Elemen Penting dalam Forensik Nuklear

Dr. Hishamuddin Husain

Sejak pertengahan tahun 90an, terdapat peningkatan di dalam jumlah laporan melibatkan bahan nuklear dan bahan radioaktif yang di luar kawalan perundangan yang dirujuk sebagai peningkatan di dalam penyeludupan secara haram bahan-bahan tersebut. Peningkatan ini telah dikenal pasti sebagai ancaman keselamatan yang signifikan kepada masyarakat dunia.

Bagi menyiasat insiden-insiden penyeludupan melibatkan bahan nuklear dan radioaktif lain, pihak berkuasa memerlukan maklumat yang boleh dipercayai berkaitan bahan, bagaimana, bila dan di mana bahan ini telah dihasilkan. Pertanyaan-pertanyaan inilah yang menjadi titik tolak kepada keperluan forensik nuklear sebagai satu elemen utama di dalam keselamatan nuklear.

Nuklear Malaysia sebagai agensi yang menjalankan penyelidikan khusus dalam sains dan teknologi nuklear memainkan peranan penting melibatkan forensik nuklear bagi menyokong penyiasatan



Rajah 1. Insiden yang dilaporkan yang dipastikan atau berkemungkinan dikaitkan dengan pemerdagangan atau penyalahgunaan bahan radioaktif, 1993-2017
(Sumber: IAEA Incident and Trafficking Database (ITDB))

pihak berkuasa. Agensi ini dilengkapi dengan prasarana yang lengkap dan mempunyai kepakaran untuk mengkaji bahan yang ditemui dan menyediakan data-data penting dalam penyiasatan terbabit selari dengan keperluan yang digariskan dalam Model Perancangan Tindakan IAEA. Penyelidikan yang dijalankan di makmal akan membekalkan data dalam dua peringkat penyiasatan iaitu pengkategorian dan pencirian. Peringkat pengkategorian (*Categorization*) adalah peringkat penentuan implikasi-implikasi keselamatan nuklear dan risiko-risiko bahan yang dijumpai kepada responder-responder pertama, kakitangan penguatkuasa undang-undang dan orang awam.

Peringkat Pencirian (*Characterization*) adalah peringkat yang lebih terperinci untuk menentukan tabii bahan radioaktif dan bukti- bukti yang berkaitan.. Ini berdasarkan maklumat daripada peringkat pengkategorian dan keperluan-keperluan di dalam perancangan pemeriksaan forensik. Pencirian harus dilakukan di dalam makmal yang berkelayakan. Matlamat peringkat pencirian adalah bagi menentukan ciri-ciri fizikal, komposisi kimia dan unsur serta nisbah isotop bagi bahan nuklear atau radioaktif lain. Ini dilakukan menerusi pelbagai analisis yang berkaitan. Jadual di bawah menunjukkan teknik dan kaedah makmal dengan tempoh yang lazim dilakukan di dalam penyelesaian analisis. Jadual di bawah menunjukkan peralatan-peralatan asas yang terdapat di bahagian-bahagian di Nuklear Malaysia.

Jadual 1. Teknik Dan Kaedah Makmal dengan Tempoh Masa yang Lazim di Dalam Penyelesaian Analisis dan Bahagian yang Terlibat di Nuklear Malaysia

	Dijalankan dalam tempoh		
	24 jam	Satu minggu	Dua bulan
	- Kadar dos (α, β, γ, n) - Pencemaran permukaan - Radiografi		
Pencirian fizikal	- Pemeriksaan visual - Fotografi - Penentuan berat - Penentuan dimensi - Mikroskop optik - Ketumpatan	- Microstruktur, morfologi, dsb. - Mikroskop Elektron Imbasan (SEM) Pembelauan sinar-X	- Nanostruktur, morfologi, dsb. - Mikroskop Elektron Transmisi - Mikroskop Elektron Imbasan
Analisis Isotopik	Spektrometri sinar Gamma beresolusi tinggi (HRGS/HPGE-RAS)	Inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS)	Teknik penjumlahan radioaktif
Radiokronometri		- ICP-MS - Spektrometer Alpha (RAS)	- HRGS (bagi U) - Spektrometri Alpha (HPGE-RAS)
Komposisi kimia/ unsur	- Pendaflor sinar-X - Pembelauan sinar -X	- ICP-MS - Fourier transform infra-red spectrometry - Spektroskopi RAMAN - SEM / spektrometri - Isotope dilution mass spectrometry	- Gas chromatography mass spectrometry - Analisis pengaktifan Neutron (NAA)
Disiplin Sains Forensik Tradisional*	Pengumpulan bukti berkait dengan cabang forensik tradisional		Analisis dan interpetasi bahan bukti yang berkait dengan cabang forensik tradisional



Rajah 2a. Mikroskop Elektron Imbasan (FESEM)



Rajah 2c. Spektrometer Pendaflor sinar-X (WDXRF)



Rajah 2b. Spektrometer Pendaflor sinar-X Spectrometer (EDXRF)

Rajah 2. Antara peralatan saintifik untuk Forensik Nuklear



Rajah 2d. Difraktometer sinar-X (XRD)

Menurut laporan daripada pakar IAEA David Kenneth Smith, dalam misi pakar ke Malaysia pada tahun 2016, Malaysia berkeupayaan di dalam memenuhi garis masa yang ditetapkan oleh IAEA bagi kitaran respon forensik nuklear untuk 24 jam, satu minggu dan dua bulan.

Nuklear Malaysia dilihat mampu menyediakan rangkaian makmal/kemudahan bagi mendokong plan tindakan IAEA. Makmal-makmal radiokimia dan alam sekitar berkeupayaan menjalankan spektroskopi Gamma, Spektroskopi Alpha, mengukur kasar alfa/beta termasuklah pembilang 'liquid scintillation' bagi Tritium dan Carbon-14. Makmal Gamma telah memperolehi persijilan ISO/IEC 17025 bagi pengukuran Gamma. Makmal kimia analitikal dapat membantu melalui peralatan seperti spektroskopi *Inductive coupled plasma mass spectroscopy* (ICPMS), *ion chromatography* dan *gas chromatography*.

Kumpulan Teknologi Bahan (MTEG) di bawah Bahagian Teknologi Industri dilihat mampu menggalas tanggungjawab untuk mengukur keadaan pepejal sampel-sampel radioaktif dan bukan radioaktif bagi tujuan penyelidikan. Antara keupayaan yang terdapat di sini adalah analisis menggunakan peralatan XRF (Pendaflour sinar X), Pembelauan sinar X (XRD), Mikroskop Elektron Imbasan (SEM) serta mikroskop optik. Kumpulan ini juga dilihat sedang mempersiapkan dokumentasi ke arah persijilan ISO/IEC 17025.

Bahagian Keselamatan Sinaran berkeupayaan bagi menyediakan khidmat penilaian dos dan pemantau radiologi. Bahagian ini dilengkapi dengan peralatan pemantauan statik dan bergerak seperti *radiation portal monitors*, *handheld radioisotope identifiers*, dosimeter termasuklah teknologi pengesanan radiologi bergerak bagi pemantauan udara.

Bidang forensik nuklear adalah satu bidang yang penting di dalam mendokong keselamatan nuklear bagi negara. Selaras dengan keupayaan kepakaran dan kemudahan yang ada, Nuklear Malaysia dilihat mampu mengorak langkah dan memberi sumbangan di dalam pencirian dan penilaian bahan radioaktif di dalam forensik nuklear sama ada di peringkat kebangsaan mahupun serantau.

Isu pencemaran udara sentiasa menjadi perhatian utama dalam kalangan rakyat termasuk penggubal undang-undang. Ia sering menjadi tajuk utama di dalam akhbar sekali gus menimbulkan kegelisahan rakyat kerana pencemaran alam sekitar boleh menjejaskan kesihatan terutamanya semasa fenomena negara dilanda jerebu. Sejak tahun 1998 Malaysia (Agensi Nuklear Malaysia) dengan kerjasama *International Atomic Energy Agency* (IAEA) telah terlibat dalam penyelidikan berkaitan pencemaran udara di bawah projek penyelidikan IAEA/RCA.

Projek ini bertujuan untuk memperkasa penggunaan teknologi nuklear dalam penganalisan sampel debu udara. Kawasan kajian yang dipilih adalah kawasan Kuala Lumpur, Lembah Klang dengan stesen pemantauan terletak di UTM Jalan Semarak, Kuala Lumpur. Persampelan dilakukan dengan alat persampelan *Gent Stack* (Hopke, 1997) yang dibekalkan oleh IAEA yang mampu mengumpulkan partikel halus (PM_{2.5}) dan partikel kasar (PM_{10-2.5}). Alat berkenaan diprogramkan selama 24 jam secara automatik dengan frekuensi persampelan 1-2 kali seminggu. Penyelidikan ini telah berlangsung sehingga tahun 2017 dengan memfokuskan kajian kepada pencirian unsur dalam PM_{2.5} dan PM_{10-2.5} iaitu mengenalpasti sumber unsur berkenaan serta pencemaran merentas sempadan (*Trans-boundary pollution*). Pengkalan data unsur dan cap jari (*finger printing*) telah pun dihasilkan untuk dijadikan rujukan pada masa akan datang.

Forensik alam sekitar adalah penilaian data yang sistematik dan saintifik yang didapati daripada lapangan atau analisis makmal dan maklumat sejarah sesuatu lokasi jenayah alam sekitar. Ini bertujuan untuk membangunkan bukti-bukti yang kukuh dan saintifik bagi tujuan penyelesaian perundangan berkaitan punca bahan pencemar yang dilepaskan kepada alam sekitar (Garis Panduan Forensik Alam Sekitar JAS 2016). Oleh itu forensik alam sekitar adalah berhubung kait dengan pemahaman terhadap masa atau peristiwa lampau, jenis dan jumlah sumber bahan kimia yang telah dibebaskan.

Bagi proses melakukan penyiasatan alam sekitar ini, makmal yang digunakan mestilah dilengkapi dengan peralatan analisis terkini di antaranya adalah aplikasi teknologi nuklear seperti *Neutron Activation Analysis* (NAA), *X-ray fluorescence* (XRF), *Proton Induced X-ray Emission* (PIXE), *Isotopes Ratio Mass Spectrometry* (IRMS) termasuklah teknik bukan nuklear seperti *Inductively coupled plasma mass spectrometry* (ICP-MS) dan *Ion chromatography* (IC).

Dalam penganalisan data pula, teknik-teknik seperti *chemical fingerprinting*, *chemical fate* dan *transport modeling*, penyiasatan hidrologi dan *multivariate receptor statistical modeling* adalah di antara kaedah yang perlu diaplikasikan bergantung kepada jenis permasalahan dan penyiasatan yang dilakukan.

Penghasilan Pengkalan Data Unsur dan Cap Jari

Salah satu keperluan dalam kajian forensik alam sekitar adalah pengkalan data. Tujuannya adalah untuk mengenalpasti bahan pencemar serta asal usul mereka. Melalui projek ini satu komposisi pengkalan data unsur di antara Januari 2002 hingga Disember 2017 telah pun dikumpulkan. Pangkalan data ini mengandungi 20 unsur iaitu *Al, As, Br, Ca, Cl, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, P, Pb, S, Si, Ti, V, Zn* termasuk jisim debu (*mass*) dan kandungan karbon hitam (*BC*). Kepekatan unsur ini ditentukan dengan menggunakan teknik nuklear NAA yang digabungkan dengan teknik ICP-MS dan juga teknik PIXE dengan kerjasama GNS Science, New Zealand dan IAEA.

Manakala jisim debu dan kandungan karbon hitam pula diukur dengan alat penimbang mikro (*microbalance*) dan alat *EEL Smoke Stain Reflectometer*. Melalui pengumpulan pangkalan data unsur ini, satu kompilasi data cap jari (*Source Fingerprint Database*) dapat dikenalpasti. Ianya dihasilkan dengan menggunakan analisis statistik *Positive Matrix Factorisation* (PMF) (Norris et al., 2008). Analisis statistik ini dapat mengenalpasti jenis dan sumber pencemaran di kawasan kajian serta peratus yang menyumbang terhadap partikel halus dan partikel kasar yang ditemui.

Melalui analisis statistik ini sumber pencemaran yang dapat dikesan bagi PM_{2.5}, adalah (*Soil dust 14.55%, 2ndry sulfate 34.26%, Smoke 6.03%, Auto dust 5.14%, Ind metal 0.54%, Auto 39.48%*). Manakala sumber pencemaran bagi PM_{10-2.5}, Kuala Lumpur, 2002-2017 (*Soil dust 7.21%, IndCl 7.49%, Auto 1 29.95%, Soil Construction 20.62%, Auto 2 34.73%*).

Pemindahan Asap Jarak Jauh

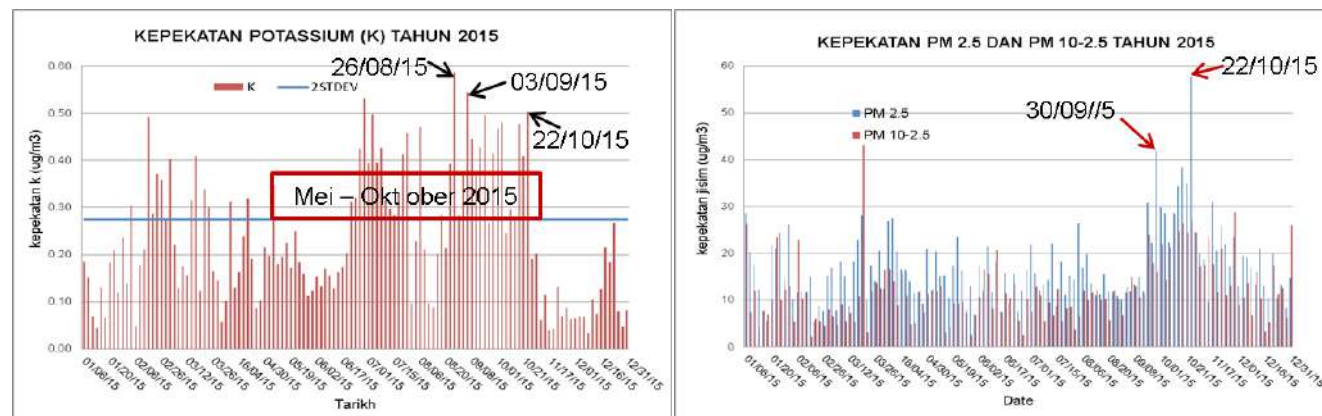
Pencemaran jerebu merentas sempadan menjadi satu isu yang menarik perhatian masyarakat Malaysia sejak dua dekad lalu. Kehadiran jerebu ini biasanya berlaku pada musim panas ketika monsun barat daya di antara bulan Mei hingga September. Walau bagaimanapun jerebu bukan saja disebabkan oleh sumber luaran tetapi juga daripada sumber tempatan seperti debu jalan, asap kenderaan, pembakaran terbuka dan lain-lain. Maklumat mengenai asal usul pencemaran jerebu daripada partikel halus (PM_{2.5}) boleh digunakan untuk mengkaji lokasi sumber yang telah menyebabkan pemindahan partikel serta bahan pencemar merentasi sempadan sehingga menyebabkan episode jerebu di Malaysia.

Penilaian Data Saintifik Pencemaran Udara Kawasan Lembah Klang, Kuala Lumpur

Shamsiah binti Abdul Rahman

Semasa pembakaran biomas pada suhu tinggi seperti pembakaran hutan, *potassium (K) chloride, KCl* dan *potassium sulphate, K_2SO_4* (Khalil et al., 2003, Begum et al., 2004, Baxla et al., 2009) akan dibebaskan. Oleh itu kandungan unsur *potassium* daripada partikel halus menjadi unsur petunjuk bagi asap daripada pembakaran biomas.

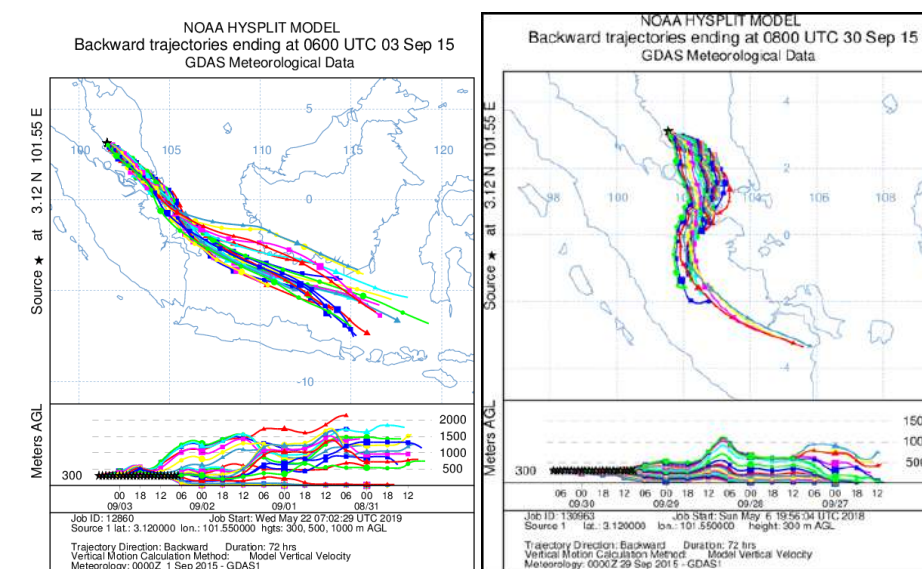
Selepas episod jerebu pada tahun 1997, umum mengetahui bahawa Malaysia diuji sekali lagi dengan episod jerebu terburuk pada tahun 2015 (2015 Southeast Asian Haze). Pertembungan fenomena El Nino semasa monsun barat daya melanjutkan lagi musim panas dan musim jerebu pada tahun itu. Melalui kajian yang dijalankan, paras jisim PM 2.5 didapati agak tinggi pada tarikh 30/9/2015 dan 22/10/2015 manakala paras *potassium* pula didapati agak tinggi sepanjang Jun hingga Oktober 2015. Kepekatan jisim adalah PM 2.5 dan PM 10-2.5 manakala kandungan *potassium* (sebagai petunjuk asap) adalah PM 2.5 pada tahun 2015.



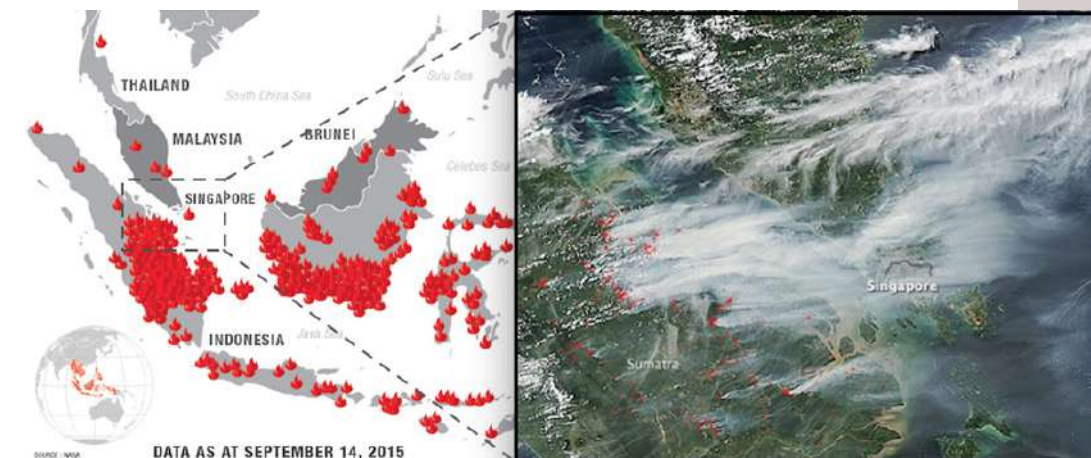
Kepekatan potassium (K) 2.5, dalam PM 2.5, Kuala Lumpur 2015

Kepekatan PM 2.5 dan PM Kuala Lumpur 2015

Hasil daripada maklumat kajian yang dijalankan, paras PM 2.5 dan *potassium* yang tinggi ketika monsun barat daya dibuktikan melalui pencemaran merentas sempadan hasil daripada pembakaran hutan dari negara jiran Indonesia sehingga menyebabkan jerebu di Malaysia. Ini boleh dilakukan dengan menggunakan *Back trajectory model the Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory (HYSPLIT)*. Dengan menggunakan model trajektori ke belakang (*backward*) jisim udara daripada hari persampelan dijalankan boleh dikira bagi mengesan lokasi sumber. Sumber PM 2.5 dan paras *potassium* yang tinggi pada contoh tarikh yang (03/09/2015 dan 30/09/2015) adalah berasal dari kepulauan Sumatra dan selatan Pulau Borneo, Indonesia. Ia disokong dengan bukti daripada gambar NASA yang menunjukkan berlakunya kebakaran pada bulan September.



Trajektori 3 hari (72 jam) ke belakang yang dikira untuk peristiwa asap pada 03 Sep. 2015 (kiri) dan PM 2.5 pada 30 Sep.2015 (kanan)



Peta menunjukkan api yang sedang aktif di Indonesia (kiri) dan imej satelit jerebu (kanan) yang dialami oleh negara Asia Tenggara pada September 2015 (Sumber: <https://earthobservatory.nasa.gov/>)

Aplikasi bermanfaat

Forensik alam sekitar adalah merupakan aplikasi sains bagi menyatakan persoalan atau penyasatan berkaitan sejarah atau punca yang bertanggungjawab terhadap pencemaran alam sekitar. Di samping itu pemahaman mengenai latar belakang, punca pencemaran, sejarah serta sumber-sumber pencemaran yang berpotensi terhadap siasatan yang dilakukan juga adalah penting. Oleh itu dalam melaksanakan penyasatan forensik alam sekitar satu pangkalan data pencirian sumber bahan mestilah diwujudkan terlebih dahulu bagi mengenalpasti bahan pencemar, serta profil mereka supaya asal usul bahan pencemar tersebut dapat dikenal pasti.

TEKNIK ANALISIS dalam Forensik Nuklear

Dr. Zalina binti Laili

Dalam penyiasatan forensik nuklear, ciri-ciri bahan nuklear atau radioaktif dikaji untuk mencari asal-usul dan mengaitkannya dengan pihak yang bertanggungjawab. Secara umumnya, analisis terhadap bahan nuklear atau radioaktif dalam konteks forensik nuklear dijalankan bagi menjawab pelbagai persoalan forensik nuklear iaitu apa jenis bahan tersebut, bagaimana, bila, di mana bahan tersebut dihasilkan dan apakah tujuan penggunaannya. Justeru, ahli forensik nuklear bertanggungjawab menyediakan keputusan saintifik kepada pihak penguatkuasa undang-undang dan menterjemahkan penemuan tersebut supaya boleh digunakan sebagai bukti pendakwaan di mahkamah.

Tanda Pengenalan Forensik

Dalam bidang forensik nuklear, istilah tanda pengenalan forensik nuklear ("nuclear forensic signatures") digunakan bagi menggambarkan ciri-ciri bahan. Ciri-ciri bahan ini dikenali sebagai tanda pengenalan bahan ("material signatures"). Tanda pengenalan bahan ini merujuk kepada ciri-ciri bahan seperti kelimpahan isotop, kepekatan unsur, bentuk fizikal dan kimia yang berkemungkinan dapat mengaitkan bahan nuklear atau radioaktif yang disiasat kepada individu, lokasi, sejarah penggunaan atau proses-proses yang terlibat. Bagi bahan nuklear (seperti uranium, torium atau plutonium), tanda pengenalan bahan boleh dibentuk atau dimusnahkan pada setiap peringkat dalam kitaran bahan api nuklear. Walau bagaimanapun, sesetengah tanda pengenalan bahan dapat dibawa pada setiap peringkat kitaran. Contohnya, tanda pengenalan dalam bijih uranium masih lagi wujud dalam bijih uranium yang dipekatkan. Sehubungan itu, setiap peringkat pemrosesan juga akan menghasilkan bahan dengan ciri unik tersendiri yang mungkin dapat digunakan sebagai tanda pengenalan forensik nuklear.



Gambar rajah 1: Tujuan analisis bahan dalam penyiasatan forensik nuklear

Ciri-ciri bahan yang dikaji adalah seperti ciri fizikal (saiz, bentuk dan tekstur), ciri kimia (keadaan kimia), ciri unsur (unsur major, unsur minor dan unsur surih) dan ciri isotop (komposisi isotop). Tanda pengenalan bahan ini memudahkan penyiasat membezakan satu bahan nuklear atau radioaktif yang disiasat dengan bahan nuklear atau radioaktif yang lain. Perbezaan inilah kunci kepada interpretasi dalam penyiasatan forensik nuklear. Walau bagaimanapun, satu ciri sahaja tidak mencukupi untuk menjawab persoalan forensik nuklear kerana tanda pengenalan tersebut hanya memberi petunjuk untuk analisis lain yang patut dijalankan sehinggalah persoalan forensik nuklear terjawab.

Bagi mencari tanda pengenalan bahan, pelbagai teknik analisis dapat digunakan dalam mencari jawapan kepada persoalan forensik nuklear. Teknik yang digunakan dalam penyiasatan forensik nuklear bagi sampel yang tidak diketahui asal-usulnya bergantung kepada persoalan penyiasatan yang ditimbulkan oleh badan penguatkuasaan undang-undang dan ia memerlukan masa untuk menjawab persoalan penyiasatan tersebut. Garis masa penyiasatan yang diguna pakai adalah selama 24 jam, seminggu dan dua bulan. Garis masa ini bertujuan memberikan penyiasat untuk mengatur pelan penyiasatan seperti pemeriksaan berkaitan sinaran (jumlah kepekatan dan dos) dan pemeriksaan fizikal (pemeriksaan visual, radiografi, dimensi dan ketumpatan) boleh dilakukan dalam tempoh 24 jam.

Teknik analisis pukal, pengimejan dan mikroanalisis merupakan teknik-teknik utama yang digunakan untuk mengukur ciri bahan di dalam sampel penyiasatan forensik nuklear. Ketiga-tiga teknik ini saling melengkapi kerana mampu mempengaruhi keputusan yang diperolehi satu sama lain. Selain itu, analisis musnah dan tanpa musnah juga turut terlibat di dalam penyiasatan ini. Analisis musnah akan berlaku apabila sampel yang dikaji mengalami perubahan bentuk fizikal dan kimia seperti yang berlaku bagi pencernaan asid atau pemisahan kimia. Manakala bagi analisis tanpa musnah pula melibatkan pemusnahan atau perubahan bentuk fizikal dan kimia bagi sesuatu bahan seperti pengukuran kepekatan bahan radioaktif atau unsur secara langsung tanpa melalui proses penyediaan secara kimia.

Dalam teknik analisis pukal ia digunakan untuk mencirikan bahan secara menyeluruh seperti menentukan unsur dan komposisi isotop. Melalui teknik analisis pukal, ia menyediakan maklumat secara purata komposisi sampel. Teknik analisis pukal boleh dilakukan sama ada secara musnah atau tanpa musnah menggunakan peralatan seperti fluoresens sinar-X (XRF), pembelauan sinar-X (XRD), induktif pasangan plasma -spektrometri (ICPMS) dan spektrometer gama.



XRD



Sistem spektrometer gama

Gambar Foto: contoh alat yang digunakan dalam teknik analisis pukal

Teknik pengimejan digunakan bagi menentukan sama ada bahan adalah homogen (sama komponen) atau heterogen (pelbagai komponen). Melalui teknik pengimejan, maklumat berkaitan saiz dan bentuk partikel, butir-butir dan komponen lain di dalam bahan akan diberikan. Maklumat tersebut boleh memberikan maklumat mod pengeluaran dan sejarah bahan yang dikaji. Jenis alat yang digunakan adalah seperti kamera, mikroskop optikal, mikroskop imbasan elektron (SEM) dan mikroskop elektron pancaran (TEM). Sebagai contoh, kes penemuan campuran serbuk plutonium dan uranium oksida di Lapangan Terbang Munich, Jerman pada tahun 1994. Sampel serbuk tersebut dianalisis menggunakan mikroskop imbasan elektron (SEM) yang menunjukkan bahawa terdapat tiga jenis partikel dalam sampel yang memerlukan pemeriksaan lebih lanjut bagi menentukan setiap jenis partikel yang ditemui.



Field emission Scanning electron microscope (FESEM)



Mikroskop elektron pancaran (TEM)

Gambar foto; Contoh alat pengimejan yang digunakan dalam penyiasatan forensik nuklear

Teknik mikroanalisis pula diperlukan bagi mencirikan bahan secara kuantitatif atau semikuantitatif. Ini bermakna, ia dapat memberikan nilai kepekatan kandungan kimia atau isotop yang hadir dalam sampel yang dikaji. Jenis alat yang digunakan adalah seperti mikroanalisis sinar-X, spektrometri pengionan terma (TIMS) dan spektrometer jisim sekunder. Sebagai contoh, teknik mikroanalisis digunakan apabila teknik pengimejan menunjukkan keheterogenan sampel, iaitu terdapat keadaan partikel pelbagai bentuk.

Selain daripada analisis terhadap bahan nuklear atau radioaktif, penyiasatan forensik nuklear juga melibatkan analisis bahan bukti yang dicemari dengan radionuklid seperti pembungkus bahan nuklear/radioaktif atau bahan surih. Penyiasatan ini melibatkan forensik tradisional yang mana bahan surih yang biasa terlibat dalam pertukaran di tempat kejadian jenayah dan biasa disiasat di makmal forensik adalah seperti cap jari, DNA, fiber, rambut, tanda alat, kaca, tumbuhan, tanah atau cat. Satu kes yang berlaku di Karlsruhe, Jerman pada Februari 1997 yang mana analisis bahan bukan nuklear yang diambil dari tempat kejadian menjadi kunci kepada penemuan asal usul dua logam beradioaktif yang ditemui di kawasan simpanan sekerap logam. Logam tersebut dicemari dengan partikel uranium oksida (uranium diperkaya rendah, LEU dan uranium diperkaya tinggi, HEU) dengan sedikit produk pembelahan. Justeru, analisis unsur ke atas logam menunjukkan ia adalah keluli tahan karat yang berasal sama ada dari Eropah Timur atau Russia.

Teknik analisis yang terlibat dalam penyiasatan forensik nuklear haruslah fleksibel dan pelan penyiasatan mungkin berubah berdasarkan keputusan semasa yang diperolehi. Secara kesimpulannya, sains forensik nuklear ini merupakan bidang yang berkait dengan analisis kimia dan saling dilengkapi dengan pelbagai disiplin sains yang



Gambar foto: Alat ICPMS yang digunakan dalam mikroanalisis forensik nuklear

lain seperti fizik nuklear, geologi radiokimia dan tradisional forensik. Keberkesanan sesuatu penyiasatan forensik nuklear adalah bergantung kepada pelan analisis forensik nuklear yang dibentuk supaya persoalan forensik nuklear terjawab melalui penggunaan teknik-teknik analisis yang dijalankan.

PENGUNAAN TEKNOLOGI NUKLEAR DI DALAM PENYIASATAN PENCEMARAN SUMBER AIR

Penyiasatan Pencemaran Sumber Air Bagaimana Teknologi Nuklear Berperanan?

Roslanzairi bin Mostapa

Pencemaran sumber air ialah perubahan yang berlaku kepada air dari segi kandungan atau warna serta sifat-sifat kimia yang disebabkan oleh pelbagai bahan pencemar dalam pelbagai bentuk seperti pepejal, cecair dan gas. Lebih 80 peratus sungai di bandar-bandar utama di negara ini boleh dianggap sungai 'mati' akibat pencemaran terutamanya sisa industri yang semakin meningkat setiap tahun akibat daripada pembangunan pesat. Kebanyakan sungai di bandar kehilangan keupayaan ekosistem untuk membekalkan air bersih, memproses kumbah dan mengekalkan produktiviti.

Penentuan nilai nisbah isotop hidrogen-2 (d^2H), oksigen-18 ($d^{18}O$) dan karbon-13 ($d^{13}C$) yang dikenali sebagai Teknik Isotop telah digunakan dengan jelas untuk mengenalpasti cecair larutresap tapak kumbus tanah dan efluen kilang kelapa sawit yang menjadi punca pencemar kepada air permukaan seperti sungai, kolam, tasik dan air bawah tanah. Nilai isotop yang tinggi akan memberikan komposisi isotop yang lebih jelas dan unik sekali gus menunjukkan keupayaan teknik nuklear dalam membezakan dan menentukan pencemaran sumber-sumber air.

Peranan hidrologi isotop adalah sebagai alat isotop dan teknik nuklear di dalam kajian kitaran air yang telah bermula selepas Perang Dunia Kedua.

Komposisi isotop stabil di dalam air semulajadi biasanya diukur menggunakan spektrometri jisim lapangan sektor magnet fokus berganda yang direka oleh Alfred Nier pada tahun 1947.

Reka bentuk ini kekal sebagai asas untuk menstabilkan jisim isotop walaupun selepas kemunculan peralatan moden yang boleh mengukur isotop secara serentak. Teknik ini telah bermula di Malaysia sejak awal 1980 iaitu selepas 30 tahun kewujudannya.

Manakala isotop sekitaran pula merupakan sesuatu unsur atau elemen yang wujud secara semulajadi yang melibatkan beberapa sahaja unsur penting seperti hidrogen, karbon, nitrogen, oksigen dan sulfur yang melimpah di dalam alam sekitar. Kewujudan elemen-elemen ini penting untuk sistem hidrologi, geologi dan biologi.

Secara umumnya, isotop sekitaran ini terbahagi kepada dua iaitu isotop stabil dan isotop radioaktif. Isotop stabil berperanan sebagai penyurih bagi air dan larutan di dalam alam sekitar kerana ia merupakan juzuk bersepadu molekul air yang secara relatifnya adalah bersifat konservatif terhadap tindakbalas bahan geologi. Ini dibuktikan benar apabila isotop-isotop hidrogen (hidrogen-1, protium; hidrogen-2, deuterium; hidrogen-3, tritium) dan oksigen

(oksigen-16, oksigen-17, oksigen-18) di dalam air iaitu air meteorik (lembapan atmosfera dan air hujan) telah mengekalkan pencirian cap jari isotopnya yang jelas dan unik. Di dalam kitaran hidrologi, air permukaan dan air bawah tanah adalah terhasil daripada air meteorik yang tersejat daripada lautan. Hubungan di antara $d^{18}O$ and d^2H (deuterium) untuk air hujan dikenali sebagai Garisan Air Meteorik Global (GAMG) yang ditakrifkan sebagai $d^2H = 8.13d^{18}O + 10.8$ yang bertindak sebagai pengkalan data kitaran hidrologi.

Bagi menghasilkan persampelan air, beberapa langkah penting dilakukan bagi tujuan pengukuran isotop untuk mencegah penyejatan atau pertukaran dengan atmosfera dan kebolehwakilan sampel bagi memastikan data-data yang boleh dipercayai itu terhasil. Oleh itu, untuk persampelan 2H dan ^{18}O , botol HDPE 100ml yang digunakan hendaklah diisi sehingga penuh bagi memastikan tiada gelembung udara dan memastikan botol tersebut ditutup dengan ketat. Sementara itu, untuk ^{13}C , sampel air dirawat terlebih dahulu menggunakan bahan kimia barium klorida ($BaCl_2$) dan natrium hidroksida ($NaOH$) bagi membentuk mendakan barium karbonat ($BaCO_3$) sebelum dianalisa.



Semua sampel diukur dengan menggunakan SERCON GEO 20-20 Spektrometer Jisim Nisbah Isotop Aliran Berterusan (Rajah 1). Sampel-sampel untuk d^2H dan $d^{18}O$; dan $d^{13}C$ dirawat terlebih dahulu di dalam *SERCON Water Equilibration System and Elemental Analyzer* sebelum dianalisa menggunakan Spektrometer Jisim Nisbah Isotop. Spektrometer Jisim Nisbah Isotop yang digunakan untuk menganalisa isotop stabil ini adalah spektrometri jisim sangat khusus yang dapat menghasilkan pengukuran tepat dan jitu untuk variasi-variasi limpahan isotop semulajadi. Sekiranya isyarat isotop yang dibangunkan dapat mengenal punca-punca pencemar, maka d^2H , $d^{18}O$ and $d^{13}C$ dapat digunakan sebagai petunjuk untuk mengenalpasti cecair larutresap tapak kambus tanah dan efluen kilang kelapa sawit sebagai punca pencemaran terhadap jasad air.



Rajah 1 Spektrometer Jisim Nisbah Isotop

Komposisi nisbah isotop stabil secara amnya dilaporkan sebagai nilai d dan ditandakan ‰ atau permil/per mill yang mana ia adalah relatif kepada piawai yang diketahui komposisi nisbah isotopnya (seperti contoh, Vienna Standard Mean Ocean Water, VSMOW untuk 2H dan ^{18}O ; dan Vienna Pee-Dee Belemnite, VPDB untuk ^{13}C). Nilai d dikira dengan menggunakan persamaan di bawah, seperti contoh, untuk deuterium atau 2H :

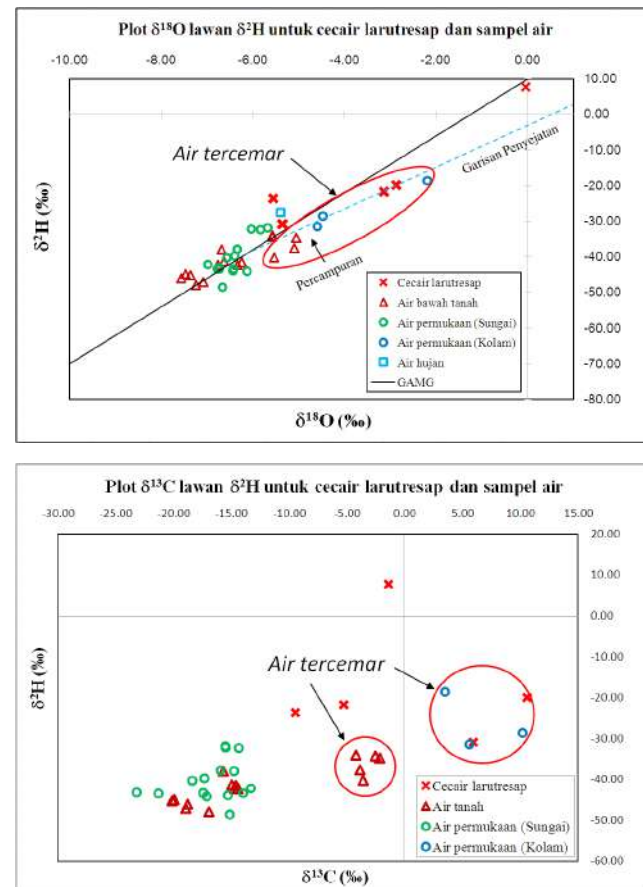
$$d^2H (\text{‰}) = \frac{R_{\text{Sampel}} - R_{\text{Piawai}}}{R_{\text{Piawai}}} \times 1000$$

Di mana R mewakili nisbah isotop berat kepada isotop ringan ($^2\text{H}/^1\text{H}$), dan R_{Sampel} dan R_{Piawai} adalah masing-masing nisbah isotop di dalam sampel dan piawai. Sampel dinyatakan sebagai berkurangan (*depleted*) atau lebih negatif jika nilai δ adalah rendah dan diperkaya (*enriched*) atau lebih positif jika nilai δ adalah tinggi relatif kepada piawai.

2 1 H Hydrogen-2 2.014101	13 6 C Carbon-13 13.00335	15 7 N Nitrogen-15 15.00010	18 8 O Oxygen-18 17.99916	34 16 S Sulphur-34 33.96786
1 1 H Hydrogen-1 1.007825	12 6 C Carbon-12 12.00000	14 7 N Nitrogen-14 14.00307	16 8 O Oxygen-16 15.99491	32 16 S Sulphur-32 31.97207

Berdasarkan daripada keputusan $\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$ dan $\delta^{13}\text{C}$ untuk kedua-dua cecair larutresap tapak kambus tanah dan efluen kilang kelapa sawit menunjukkan komposisi isotop yang jelas dan unik dengan nilai isotop diperkaya yang tinggi berbanding dengan nilai isotop sampel air yang lain (air permukaan dan air bawah tanah). Ciri-ciri unik ini adalah disebabkan oleh proses biologi penguraian bakteria yang berlaku semasa pelupusan sisa pepejal dan rawatan efluen kilang kelapa sawit tersebut. Kecenderungan bakteria untuk menggunakan isotop yang lebih ringan (d^4H , d^{16}O dan d^{12}C) untuk proses metabolisme menghasilkan sisa dengan komposisi isotop yang lebih berat di dalam cecair punca-punca pencemar tersebut.

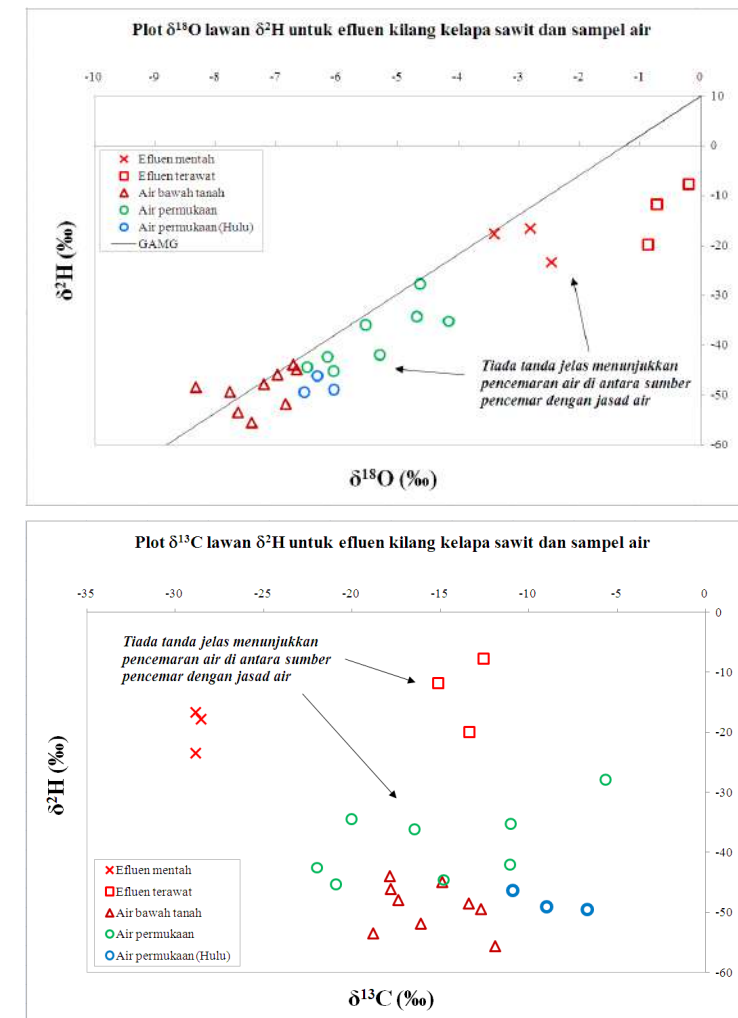
Dua proses yang boleh ditunjukkan daripada plot isotop stabil tersebut ($\delta^{18}\text{O}$ lawan $\delta^2\text{H}$) adalah penyejatan dan pencampuran. Walau bagaimanapun, proses ataupun mekanisme yang menyumbang kepada pencemaran ialah pencampuran. Pencampuran yang berlaku di antara punca pencemar dengan jasad air menyebabkan berlakunya kejadian pencemaran. Ini dapat dilihat dengan jelas di dalam plot $\delta^{18}\text{O}$ lawan $\delta^2\text{H}$ dan $\delta^{13}\text{C}$ lawan $\delta^2\text{H}$ (Rajah 2) di mana jasad air yang telah tercemar (air bawah tanah dan kolam) telah terdedah kepada proses pencampuran dengan cecair larutresap menyebabkannya menjadi lebih diperkaya dan bergerak ke arah sumber pencemar tersebut.



Rajah 2

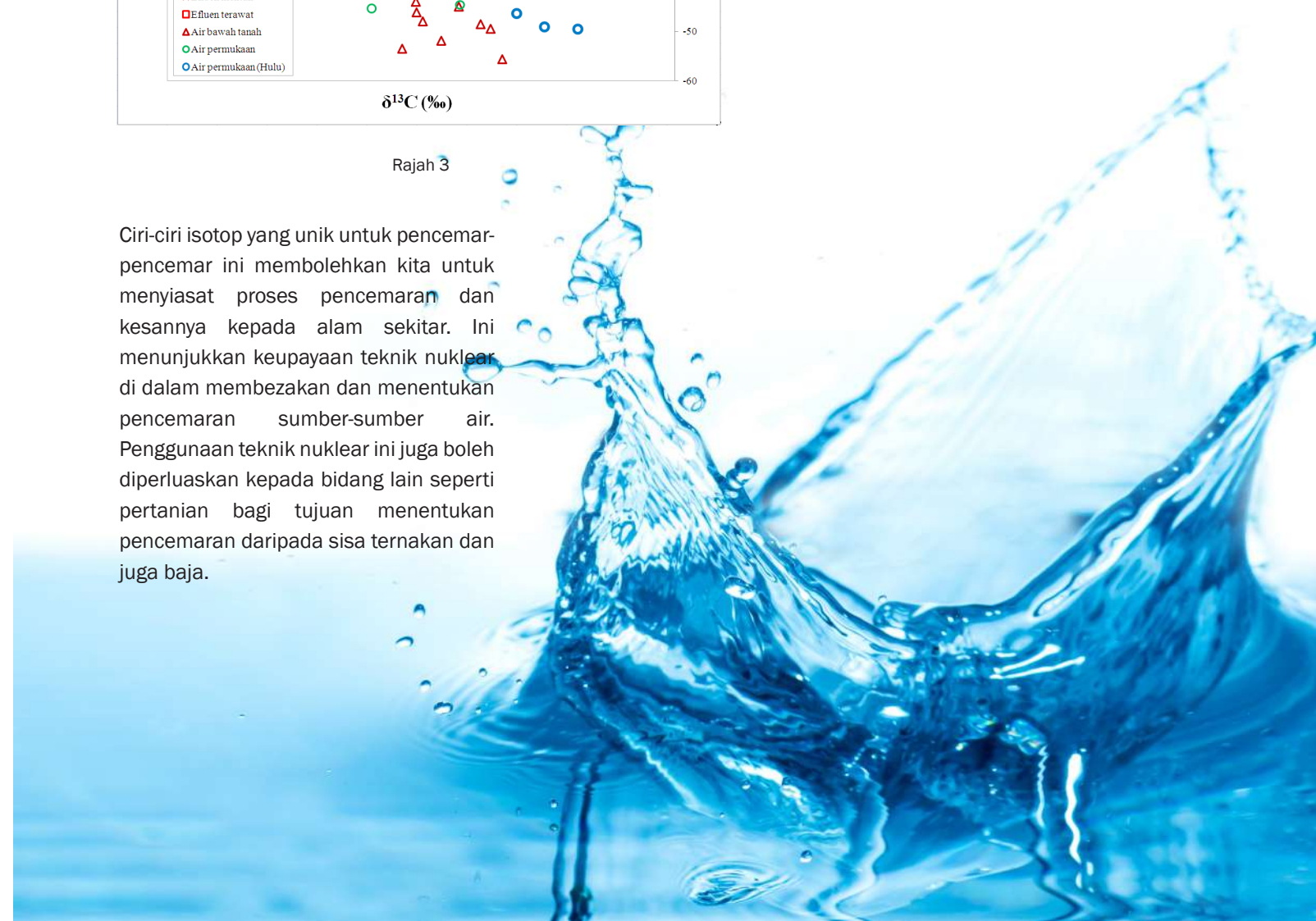
Walaupun bagaimanapun, tiada tanda jelas yang menunjukkan berlakunya pencemaran air untuk

kajian efluen kilang kelapa sawit. Air permukaan kawasan hulu (sampel air kawalan) juga menunjukkan ciri-ciri isotop yang sama dengan lain-lain sampel air seperti yang dijangkakan. Ini menunjukkan kemungkinan bahawa pihak pengurusan yang bertanggungjawab menguruskan premis tersebut telah melaksanakan polisi kawalan pencemaran dan langkah-langkah pencegahan yang berkesan.



Rajah 3

Ciri-ciri isotop yang unik untuk pencemar-pencemar ini membolehkan kita untuk menyiasat proses pencemaran dan kesannya kepada alam sekitar. Ini menunjukkan keupayaan teknik nuklear di dalam membezakan dan menentukan pencemaran sumber-sumber air. Penggunaan teknik nuklear ini juga boleh diperluaskan kepada bidang lain seperti pertanian bagi tujuan menentukan pencemaran daripada sisa ternakan dan juga baja.



Memahami Elemen Utama dalam Sekuriti Nuklear

Nazaratul Ashifa binti Abdullah Salim

Pada tahun 2016, melalui jemputan Badan Tenaga Atom Antarabangsa (IAEA), kerajaan Malaysia melalui Agensi Nuklear Malaysia telah menghantar wakil bagi mengikuti latihan intensif dalam bidang forensik nuklear 'IAEA Residential Assignment for Human Capacity Building in Nuclear Forensic Analytical Measurements' di Hungary. Latihan tersebut telah dijalankan di Hungarian Academy of Sciences, Centre for Energy Research, Budapest pada 1 Oktober hingga 16 Disember 2016. Institusi ini telah mendapat pengiktirafan 'IAEA Collaborating Center' untuk forensik nuklear bermula pada tahun 2016 sehingga 2020.

Sepanjang latihan, pendedahan kepada pengenalan pengetahuan dan kemahiran dalam membuat analisis bahan nuklear atau radioaktif yang digunakan dalam pemeriksaan forensik nuklear diterangkan secara menyeluruh. Latihan ini melibatkan analisis forensik nuklear ke atas bahan nuklear dalam makmal yang terkawal dan menekankan pelaksanaan pengujian forensik mengikut garis panduan teknikal terbitan IAEA seperti Nuclear Security Series No. 2-G (Rev. 1) "Nuclear Forensics in Support of Investigations" serta jadual analisis yang dikeluarkan oleh 'Nuclear Forensics International Technical Working Group' (ITWG).

Penglibatan dalam penyiasatan forensik nuklear memerlukan pengukuran atau penganalisaan menyeluruh dengan mengukur,

mengkategorikan dan mencirikan bahan nuklear di luar kawalan undang-undang. Bagi membina situasi seperti kejadian sebenar, satu palet bahan api nuklear telah digunakan sebagai bahan kes sepanjang latihan tersebut. Selain latihan dalam teras penyiasatan forensik nuklear, penglibatan dalam prosedur pengurusan kejadian jenayah radiological turut. Keseluruhan latihan dikendalikan dalam bentuk sesi ceramah, perbincangan, simulasi dan praktikal.

Pelan Penganalisaan Forensik Nuklear

Prosedur pelan penganalisaan merupakan elemen penting dalam prosedur penyiasatan nuklear forensik. Melalui pelan penganalisaan ini dapat menentukan kuantiti bahan yang diperlukan semasa proses penganalisaan berat sampel digunakan.

Kerangka pelan penganalisaan yang mengguna pakai kaedah dan tempoh masa yang disarankan oleh ITWG. Latihan forensik nuklear yang diikuti di Budapest ini memberi hipotetikal sampel iaitu satu bahan nuklear yang telah dijumpai di dalam sebuah unit flat semasa serbuan. Terdahulu, satu simulasi pengeledahan untuk mencari bahan nuklear turut dijalankan. Prosedur operasi piawai digunakan dalam operasi pengurusan kejadian jenayah radiological di tempat kejadian antara

lain untuk menentukan individu yang terlibat, penggunaan alat pengesan yang bersesuaian, penggunaan peralatan perlindungan personel (PPE), mengkategorikan jenis bahan nuklear di lapangan dan penyimpanan bahan nuklear sebelum dihantar ke makmal. Bahan nuklear yang menjadi subjek latihan adalah satu palet bahan api nuklear yang mengandungi kelimpahan U-235 tidak lebih daripada 5 peratus iaitu daripada gred uranium pengayaan rendah.

(a) dan (b) - Simulasi pengurusan kejadian jenayah radiological;

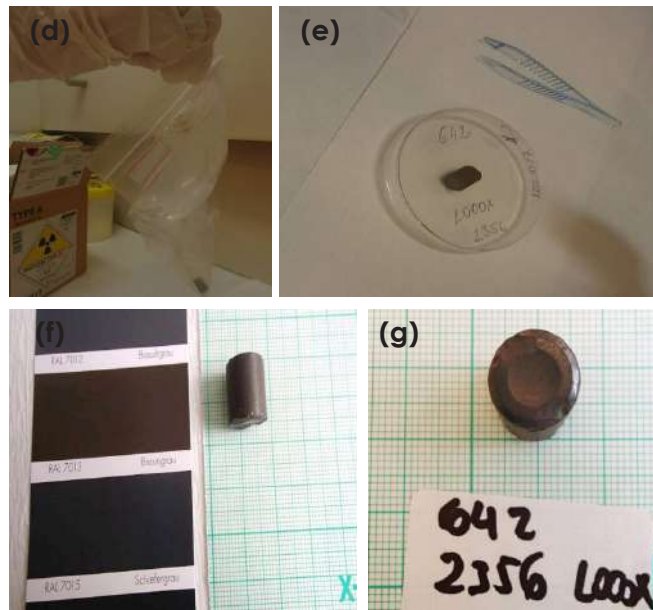
(c) - bahan bukti dikategorikan di lapangan dengan pengesan yang bersesuaian sebelum dibawa ke makmal



Sepanjang menjalani latihan, pelan penganalisaan turut dibangunkan berdasarkan soalan-soalan yang dikemukakan oleh badan penguatkuasa undang-undang untuk mengetahui jenis bahan, sama ada ia merupakan bahan nuklear atau bahan radioaktif, ciri-ciri bahan atau adakah bahan tersebut kepunyaan negara.

Analisis Forensik Nuklear

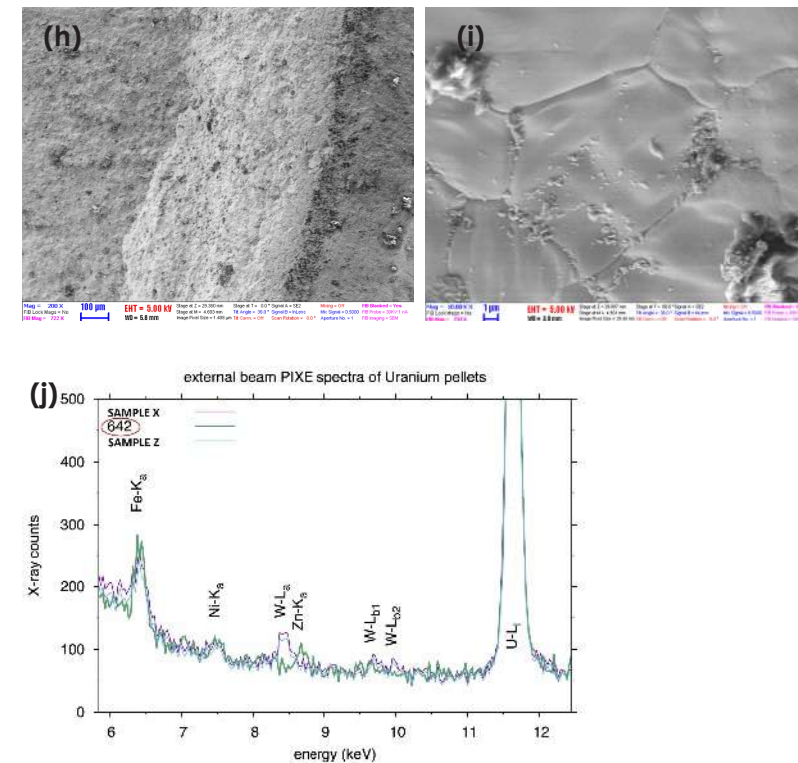
Dalam tempoh masa 24 jam dari penerimaan bahan bukti (palet bahan api nuklear) di makmal, prosedur radiologikal perlu dilaksanakan. Semua langkah bermula daripada proses penerimaan sampel sehingga selesai analisis terakhir harus memelihara rantai penjaminan bahan bukti. Pemeriksaan ke atas bungkusan bahan bukti mesti dilakukan. Seterusnya melibatkan prosedur yang mengambil foto, membuat sampel sapuan pada permukaan bungkusan untuk memastikan tiada kontaminasi dan kemudian mengambil bacaan kadar dos permukaan. Personel yang mengendalikan bahan bukti perlu memakai kelengkapan peralatan perlindungan personel dan dikendalikan dalam kebuk wasap. Ketika bungkusan dibuka, fotografi, sampel sapuan dan bacaan kadar dos permukaan sekali lagi diambil. Setelah bahan bukti dikeluarkan, ia diberikan kod makmal sebagai 642 dan dibuat pembungkusan semula untuk proses seterusnya. Setiap proses dan pengukuran perlu direkodkan.



(d) Bahan bukti dikeluarkan dari bungkusan asal;
(e) diberi kod makmal 642;
(f) dan (g) dilakukan pemeriksaan fizikal

Antara proses lain yang terlibat ialah semasa pemeriksaan ciri fizikal, bahan bukti ditimbang berat, diukur dimensi (lebar, panjang, tinggi) dan ditentukan densitinya. Warna bahan bukti dirujuk dengan skala warna piawai dan diambil fotografi bersama skala tersebut. Ciri luaran diperhatikan dan direkodkan sama ada mempunyai lubang, lengkung dan lain-lain. Selain itu, ciri tersebut turut diteliti di bawah mikroskop optikal. Kemudian kandungan isotop di dalam bahan bukti dikenalpasti dengan peralatan 'identifinder'. Pada peringkat ini, bahan bukti telah dapat disahkan sebagai bahan nuklear. Pemeriksaan terperinci dibuat untuk mengetahui jumlah aktiviti, kandungan isotopnya dan sebarang kontaminasi isotop radioaktif dengan spektrometri gama. Kehadiran unsur kimia dikesan dengan XRF sekiranya ada. Laporan akhir perlu disediakan dalam tempoh 24 jam.

Peringkat penyiasatan forensik nuklear selama satu minggu melibatkan pemerhatian fizikal bahan nuklear seperti morfologi permukaan, saiz partikal atau butiran dan kehomogenan dengan peralatan SEM. Profil unsur kimia, bentuk oksida dan kajian struktur diperincikan melalui analisis XRD dan PIXE. Selain itu, kandungan atau pengayaan isotopik ditentukan dengan lebih tepat melalui spektrometri gama beresolusi tinggi. Tentukur umur bahan nuklear juga dapat dianalisis dengan kaedah yang sama. Sekurang-kurangnya 2 gram berat bahan nuklear dilarutkan dalam media berasid untuk penganalisaan dengan ICPMS dan HR-ICPMS bagi menentu dan mengesahkan kandungan atau pengayaan isotopik. Keseluruhan analisis perlu direkodkan dan laporan akhir disediakan dalam tempoh satu minggu.



(h) dan (i) Pemerhatian morfologi ke atas permukaan bahan nuklear;
(j) spektrum bagi analisis menggunakan PIXE bersama sampel lain sebagai perbandingan.

Pada peringkat seterusnya, struktur bahan diperincikan melalui analisis TEM. Selain itu, analisis mendalam secara kaedah kombinasi radiokimia dan spektrometri jisim dijalankan bagi menentukan kandungan isotopik atau pengayaan dengan lebih tepat, ketidaktulenan kimia seperti kandungan unsur nadir bumi serta penentuan kehadiran plutonium sekiranya bahan nuklear pernah melalui kitaran pemprosesan semula bahan api terpakai. Bagi menentukan sama ada palet bahan api nuklear yang menjadi subjek kes kepunyaan negara Hungary, keseluruhan parameter pengukuran dibandingkan dengan pangkalan data yang telah dibangunkan menerusi *Hungarian National Nuclear Forensic Library* (NNFL). Proses penganalisaan direkodkan dengan teliti, yang memerlukan maklumat tersebut diterjemahkan bersama pakar forensik dan laporan akhir disediakan dalam tempoh dua bulan.



**NUKLEAR
MALAYSIA**

Agensi Nuklear Malaysia (Nuklear Malaysia)

PRODUK

1. Lateks Getah Tervulkan Dengan Sinaran
2. Kit Diagnostik Perubatan dan Radioisotop Perubatan
3. Sebatian Polimer untuk Industri Automotif
4. Varieti Baru Tanaman Hiasan dan Pokok Buah-Buahan

RUNDING CARA

1. Keselamatan & Kesihatan Sinaran
2. Penilaian & Pencemaran Alam Sekitar
3. Jaminan Kualiti Mikrob
4. Pengurusan Sisa Radioaktif
5. Reka Bentuk Loji & Kawalan Proses
6. Reka Bentuk Kejuruteraan dan Pembangunan
7. Penasihat Teknologi Nuklear & Perancangan Dasar

Untuk maklumat lanjut sila hubungi:

Ketua Pengarah
Agensi Nuklear Malaysia (Nuklear Malaysia)
Bangi, 43000 KAJANG, Selangor Darul Ehsan

U/P: Ahmad Sahali Mardi
Pengarah,
Bahagian Pengkomersilan Teknologi

Tel: 03-8911 2000 / 03-8925 2434 (DL)

Faks: 03-8925 2588

E-mail: sahali@nuclearmalaysia.gov.my

Website: www.nuclearmalaysia.gov.my

KHIDMAT

Penyelesaian Kejuruteraan Untuk R&D

1. Reka Bentuk dan Sistem Automasi
2. Fabrikasi Komponen Kejuruteraan

Pemantauan Alam Sekitar

1. NORM/TENORM
2. Pemantauan Sinaran Tidak Mengion (NIR)
3. Penilaian Impak Bahan Radiologi
4. Pengurusan Sumber Air
5. Pengurusan Sisa Pertanian, Industri dan Domestik

Khidmat Kejuruteraan Teknikal

1. Pemeriksaan dan Ujian Bahan, Struktur dan Loji Industri
2. Pemeriksaan Industri dan Kawalan Proses
3. Teknologi Pertanian
4. Teknologi Perubatan
5. Analisa dan Pernilaian Bahan

Jaminan Kualiti

1. Dosimetri Personel
2. Jaminan Kualiti Perubatan
3. Jaminan Kualiti Industri

Sterilisasi Bukan Kimia

1. Penyinaran Gamma
2. Penyinaran Elektron

Latihan

1. Keselamatan & Kesihatan Sinaran
2. Sinar X- Perubatan
3. Penilaian Tanpa Musnah (NDT)
4. Instrumentasi dan Kejuruteraan
5. Keselamatan Persekitaran dan Kesihatan
6. Pengurusan Teknologi



i-NUKLEAR
ILMU . IDEA . INFORMASI



AGENSI NUKLEAR MALAYSIA
Bangi, 43000 Kajang, Selangor Darul Ehsan



<https://www.nuclearmalaysia.gov.my>



Nuklear Malaysia



nuklearmalaysia



Agensi Nuklear Malaysia



Agensi Nuklear Malaysia