

PENGEMBANGAN METODA FORENSIK NUKLIR

Budi Briyatmoko dan Tim Forensik Nuklir
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN

ABSTRAK

Pengembangan metoda forensik nuklir. Pengembangan metoda forensik nuklir dilakukan dengan cara mengikuti dan mengacu pada IAEA *Nuclear Security Series* No. XX. Setiap bahan nuklir mempunyai beberapa karakteristik *signature* (sidik jari) sendiri yang berbeda. Untuk melakukan karakterisasi bahan nuklir dilakukan pengujian/ pengukuran/ analisis terhadap empat sampel batuan uranium dan tiga sampel *yellow cake* dengan menggunakan metoda dan peralatan yang ada sesuai dengan kemampuan laboratorium. Pada tulisan ini disampaikan hasil kegiatan forensik nuklir di PTBBN tahun 2015. Lingkup bahan nuklir yang dikarakterisasi adalah batuan uranium dan *yellow cake*. Karakteristik yang harus diketahui untuk batuan uranium meliputi geologi, mineralogi, konsentrasi kandungan uranium, isotop uranium, isotop stabil, dan kandungan unsur pengotor. Sedangkan karakteristik yang harus diketahui untuk *yellow cake* meliputi bentuk kimia, karakteristik fisik, morfologi/kristalografi, konsentrasi uranium, isotop uranium, radionuklida turunan uranium, isotop stabil, kandungan unsur pengotor, dan informasi proses. Hasilnya menunjukkan bahwa karakteristik yang dimiliki oleh batuan uranium yang berasal dari Eko Remaja Kalan Kalimantan Barat berbeda dengan karakteristik yang dimiliki oleh batuan uranium dari Tor Siandulimat Sumatra Utara, Sungai Marta Hulu Mahakam Kalimantan Timur, maupun dari Boteng Mamuju Sulawesi Barat karena kumpulan karakteristik tersebut merupakan sidik jari dari asal batuan uraniumnya. Demikian juga untuk karakteristik *yellow cake* yang berasal dari Kalimantan berbeda dengan *yellow cake* yang berasal dari Petro Kimia Gresik maupun *yellow cake* dari Cogema Perancis.

Kata kunci: forensik nuklir, perpustakaan nasional forensik nuklir, batuan uranium, *yellow cake*

PENDAHULUAN

Masalah penyelundupan nuklir (*nuclear smuggling*) mulai ada pada sekitar tahun 1990an dan sampai sekarang masih menjadi perhatian dunia. Terkait dengan masalah tersebut, pertanyaan yang harus bisa dijawab adalah tujuan penggunaan bahan nuklir yang tidak diketahui identitasnya, asal mula bahan nuklir, pemilik terakhir yang sah dan rute penyelundupan dari bahan nuklir tersebut. Teknik untuk menjawab pertanyaan tersebut dapat diketahui melalui safeguard dan material sains. Gabungan dari kedua metoda analisis ini merupakan titik awal dari forensik nuklir ^[1]. Forensik nuklir adalah analisis ilmiah yang komprehensif terhadap bahan nuklir dan bahan radioaktif lainnya atau barang bukti yang terkontaminasi dengan bahan radioaktif dalam konteks hukum nasional dan internasional dan keamanan nuklir ^[2]. Forensik nuklir dan interpretasi forensik nuklir telah menjadi alat yang semakin penting dalam memerangi perdagangan gelap bahan nuklir dan bahan radioaktif. IAEA telah banyak menerbitkan panduan teknis investigasi terkait dengan kejadian forensik nuklir ^[3, 4].

Pemeriksaan forensik nuklir dilakukan melalui pengujian, pengukuran dan analisis langsung terhadap bahan-bahan tersebut dan membandingkannya dengan data referensi. IAEA telah mengembangkan konsep perpustakaan nasional forensik nuklir. Di dalam

perpustakaan nasional forensik nuklir tersebut akan tersimpan kumpulan informasi dan data karakteristik bahan nuklir dan bahan radioaktif lainnya yang diproduksi, digunakan, atau disimpan di dalam suatu negara. Melalui perpustakaan nasional forensik nuklir dapat membantu investigasi forensik tentang sejarah dari bahan nuklir tertentu karena di dalamnya tersimpan data analisis dan informasi lengkap dari semua bahan nuklir yang dimiliki. Lebih dari itu juga dapat digunakan untuk menguji asal mula bahan nuklir apakah dari domestik atau luar. Perpustakaan nasional forensik nuklir mempunyai peran yang sangat penting dalam meningkatkan keamanan nuklir negara ^[5]. Pentingnya forensik nuklir dalam meningkatkan keamanan nuklir dunia disampaikan juga dalam Konferensi Tingkat Tinggi Keamanan Nuklir yang diadakan di Washington DC, Amerika Serikat pada tanggal 30 Maret sampai dengan 1 April 2016. Dalam konferensi tersebut, tiga puluh negara setuju untuk memajukan forensik nuklir sebagai elemen kunci dari keamanan nuklir yang efektif dan Indonesia termasuk di dalamnya ^[6]. BATAN melalui PTBBN telah mulai mengumpulkan informasi dan melakukan karakterisasi bahan nuklir yang dimiliki, baik itu yang diproduksi sendiri, atau yang digunakan maupun yang disimpan melalui kegiatan *Coordinated Research Project* yang didanai oleh IAEA. Judul dari project tersebut adalah *Identification of High Confidence Nuclear Forensics Signatures for the Development of a National Nuclear Forensics Library*. Kegiatan tersebut dilakukan sejak tahun 2014 dan akan berakhir pada tahun 2016. Pada tulisan ini akan disampaikan penjelasan kegiatan yang dilakukan pada tahun 2015. Hasil data yang diperoleh masih belum lengkap karena terbatasnya peralatan yang dimiliki.

METODOLOGI

Metodologi yang dilakukan untuk mengembangkan metoda forensik nuklir adalah dengan mengikuti dan mengacu pada IAEA *Nuclear Security Series* No. XX ^[2]. Setiap bahan nuklir yang diidentifikasi mempunyai beberapa karakteristik yang harus diketahui yang merupakan signature (sidik jari) dari bahan nuklir tersebut. Kemudian untuk melakukan karakterisasi dari setiap sidik jari yang diperlukan pengujian/ pengukuran/ analisis menggunakan peralatan dan metoda umum yang ada sesuai dengan kemampuan yang dimiliki laboratorium. Lingkup bahan nuklir untuk kegiatan yang dilakukan pada tahun 2015 adalah batuan uranium yang berasal dari empat lokasi di Indonesia yaitu Eko Remaja Kalan Kalimantan Barat, Tor Siandulimat Sumatra Utara, Sungai Marta Hulu Mahakam Kalimantan Timur, dan Boteng Mamuju Sulawesi Barat dan tiga jenis *yellow cake* yang berasal dari Kalimantan, Petro Kimia Gresik dan Cogema Perancis. Karakteristik yang harus diketahui untuk batuan uranium meliputi geologi, mineralogi, konsentrasi kandungan uranium, isotop uranium, isotop stabil, dan kandungan unsur

pengotor. Sedangkan karakteristik yang harus diketahui untuk *yellow cake* meliputi bentuk kimia, karakteristik fisik, morfologi/kristalografi, konsentrasi uranium, isotop uranium, radionuklida turunan uranium, isotop stabil, kandungan unsur pengotor, dan informasi proses.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Batuan uranium

Sebagai sampel uji, ada empat jenis batuan uranium yang diperoleh dari Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir (PTBGN-BATAN) yaitu batuan uranium dari Eko Remaja Kalan Kalimantan Barat, Tor Siandulimat Sumatra Utara, Sungai Marta Hulu Mahakam Kalimantan Timur, dan Boteng Mamuju Sulawesi Barat.

Karakteristik Batuan uranium dari Eko Remaja Kalan Kalimantan Barat.

Berdasarkan informasi yang diperoleh dari PTBGN, karakteristik Geologi batuan uranium tersebut adalah:

- Geology formation: Malihan Pinoh Rock
- Deposit type: *Vein type*
- Mining technique: *Underground shrinkage stopping mine*
- Color: *Grayish black*

Berdasarkan informasi yang diperoleh dari PTBGN, karakteristik Mineralogi batuan uranium tersebut adalah:

- *Mineral present: Uranite, branerit, davidit, and gumit.*
- *Chemical composition of mineral:*
 - *Uranite:* UO_2
 - *Branerit:* $(U^{4+}, Ca)(Ti, Fe^{3+})_2O_6$ (*Uranium Calcium Titanium Iron Oxide*)
 - *Davidit:* $La_{0.7}Ce_{0.2}Ca_{0.1}Yo_{0.75}U_{0.25}Ti_{15}Fe_{3+}5038$
 - *Gumit:* $UO_3 \cdot nH_2O$

Hasil karakterisasi yang dilakukan oleh PTBBN adalah:

Uranium concentration, diukur dengan menggunakan metoda Titrasi Potensiometri.

- 1017,57 ppm

Uranium isotope, dianalisis menggunakan spectrometer gamma.

- *Isotope ratio* $^{235}U/^{238}U = 0.0072975$
- *Standard deviation* = 0.0002

Trace element concentration, diukur dengan menggunakan alat *Atomic Absorption Spectrometer* dan / atau *Neutron Activation Analysis*.

- Ce: 2318.51±11.49 µg/g
- Eu: 9.79±0.61 µg/g
- Hf: 38.16±4.85 µg/g
- La: 1138.65±3.62 µg/g
- Sc: 7.60±0.68 µg/g
- Sm: 222.93±2.14 µg/g
- Th: 30.42±6.51 µg/g
- U: 158.52±3.24 µg/g

Ketidak pastian dalam pengukuran ini pada tingkat kepercayaan 95 % dan k=2

Selanjutnya untuk mengetahui karakteristik sampel batuan uranium lainnya dilakukan dengan cara yang sama seperti butir-butir tersebut di atas. Hasilnya memberikan karakteristik yang masing-masing berbeda. Perbedaan karakteristik inilah yang dapat dipakai sebagai sidik jari dari batuan uranium tertentu. Selanjutnya pada Tabel-I sampai dengan Tabel-IV ditampilkan kumpulan data karakteristik batuan uranium.

Tabel-I. Karakteristik Geologi Batuan Uranium

Mine location	Geology formation	Deposit type	Mining Technique	Color
Eko Remaja, Kalan, Kalimantan Barat	Batuan Malihan Pinoh	Vein type	Underground Stopping Mine	Abu-abu kehitaman
Tor Siandulimat, Sumatra Utara	Formasi Sibolga	Sedimenter	-	Coklat kekuningan
Sungai Marta, Hulu Mahakam, Kalimantan Timur	Riolit Nyaan	Volkanik	-	Abu-abu kehitaman
Boteng, Mamuju, Sulawesi Barat	Formasi Gunung Api Adang	Volkanik	-	Coklat kekuningan - keputihan

Tabel-II. Karakteristik Mineralogi

<i>Mine location</i>	<i>Mineral present</i>	<i>Chemical composition of mineral</i>	<i>Volume percentage of mineral</i>
Eko Remaja, Kalan, Kalimantan Barat	Uraninit Branerit Davidi Gumit	UO ₂ ((U ₄₊ , Ca)(Ti, Fe ³⁺) ₂ O ₆) (La _{0.7} Ce _{0.2} Ca _{0.1} Y _{0.75} U _{0.25} Ti ₁₅ Fe ₃ +5O ₃₈) UO ₃ nH ₂ O	-
Tor Siandulimat, Sumatra Utara	Pitchblende	UO ₂	-
Sungai Marta, Hulu Mahakam, Kalimantan Timur	Pitchblende	UO ₂	-
Boteng, Mamuju, Sulawesi Barat	Thorianite	ThO ₂	-

Tabel-III. Konsentrasi uranium

<i>Mine Location</i>	<i>ppm</i>
Eko Remaja, Kalan, Kalimantan Barat	1017.57
Tor Siandulimat, Sumatra Utara	347
Sungai Marta, Hulu Mahakam, Kalimantan Timur	120
Boteng, Mamuju, Sulawesi Barat	3000

Tabel-IV. Trace element

<i>Mine location</i>	Eko Remaja, Kalan, Kalimantan Barat	Tor Siandulimat, Sumatra Utara	Sungai Marta, Hulu Mahakam, Kalimantan Timur	Boteng, Mamuju, Sulawesi Barat
<i>Parameter</i>	<i>Mg/Kg</i>	<i>Mg/Kg</i>	<i>Mg/Kg</i>	<i>Mg/Kg</i>
As	-	804,21 ± 3,62	1068,66 ± 7,69	1015,56 ± 3,99
Ce	2318,51 ± 11,49	140,10 ± 27,04	4894,06 ± 109,05	632,82 ± 17,63
Cs	-	46,09 ± 2,77	-	66,74 ± 1,69
Eu	9,79 ± 0,61	3,57 ± 0,35	-	3,59 ± 0,36
Hf	38,16 ± 4,85	17,09 ± 1,85	-	22,17 ± 1,53
La	1138,65 ± 3,62	123,93 ± 1,20	872,13 ± 1,80	126,74 ± 1,17
Sb	-	21,13 ± 1,11	45,79 ± 2,22	11,18 ± 0,68
Sc	7,60 ± 0,68	8,47 ± 0,50	15,22 ± 0,30	9,44 ± 0,27
Sm	222,93 ± 2,14	-	-	-
Th	30,42 ± 6,51	92,70 ± 3,22	-	109,18 ± 1,86

U	158,52 ± 3,24	1482,65 ± 5,17	1,90 ± 0,05	1843,39 ± 4,37
Ba	-	-	7105,24 ± 215,91	-
Co	-	-	105,94 ± 7,05	-

Pada analisis karakteristik yang dilakukan untuk batuan uranium, analisis isotop stabil tidak bisa dilakukan karena harus menggunakan Spektrometer Massa yang tidak dipunyai oleh PTBBN.

Yellow cake

Ada tiga jenis sampel *yellow cake*, yaitu *yellow cake* yang berasal dari Kalimantan, Petro Kimia Gresik (PKG) dan Cogema Perancis.

Karakterisasi semuanya dapat dilakukan di PTBBN, meliputi:

Chemical form

- *Compound name* diperkirakan terdiri dari : U3O8, UO3, U4O9

Physical Characteristic

- *Density*: 6.2289 g/cc (YC Perancis), 5.8477 g/cc (YC PKG), 3,9021 g/cc (YC Kalan)
- *Method*: **ULTRAPYC-1200 QUANTACHROME**
- **Picture of Ultrapyc – 1200 Quantachrome**

Morphology

- *Method*: *Microscopy Dinolite*
- Warna, *particle size* dan bentuknya berbeda untuk setiap *yellow cake* seperti pada gambar berikut di bawah ini.



Gambar x. *Yellow cake* dari Cogema berwarna kecoklatan dan butirannya nampak cukup solid



Gambar y : *Yellow cake* dari Kalimantan berwarna kuning dan di permukaan butirannya nampak ada seperti serbuk.



Gambar z : *Yellow cake* dari PKG berwarna hitam dan butirannya nampak lebih solid.

Uranium Concentration, diukur dengan menggunakan metode Titrasi Potensiometri.

- *Uranium concentration: 56.3 % (YC-Kalimantan); 50 - 60 % (YC-side product of phosphate fertilizer); 76.23 % (YC-COGEEMA)*
- *Uranium concentration uncertainty: N/A*

Uranium Isotopes

- *Method: Gamma Spectrometry*
- *Isotope ratio YC-Kalimantan: $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.00555$; $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.00013258$*
- *Isotope ration YC-side product of phosphate fertilizer plant: $^{235}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.0064$; $^{234}\text{U}/^{238}\text{U} = 0.000055823$*
- *Isotope ratio uncertainty: N/A*

Trace element

- *Method: Spectrometry*
- *Instrument: Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS) brands Agilent Technologies 240FS AA.*
- *Trace element: Ag, Al, B, C, Ca, Cd, Cl, Co, Cr, Cu, Dy, F, Fe, Gd, Mg, Mn, Mo, H, Ni, Pb, Si, Sn, V and Zn (YC-COGEEMA)*
- *Trace element concentration: Ag: 0.14, Al: 2.75, B: 0.3, C: 100, Ca: 58.73, Cd: 0.05, Cl: 15, Co: 0.80, Cr: 3.15, Cu: 1.36, Dy: 0.15, F: 10, Fe: 48.68, Gd: 0.5, Mg:*

25.57, Mn: 3.63, Mo: 10.92, H: 80, Ni: 2.58, Pb: 0.75, Si: 24.95, Sn: 10.03, V: 101.95 and Zn: 3.62 (COGEMA)

- *Trace element*: Ag, Al, B, C, Ca, Cd, Cl, Co, Cr, Cu, Dy, F, Fe, Gd, Mg, Mn, Mo, H, Ni, Pb, Si, Sn, V and Zn (*YC-side product of phosphate fertilizer*)
- *Trace element concentration*: Ag: 0.047, Al: 3.97, B: 0.3, C: 100, Ca: 75.34, Cd: 0.07, Cl: 15, Co: 0.81, Cr: 3.81, Cu: 1.19, Dy: 0.15, F: 10, Fe: 18.53, Gd: 0.5, Mg: 25.12, Mn: 3.82, Mo: 23.67, H: 80, Ni: 1.86, Pb: 0.72, Si: 31.90, Sn: 6.32, V: 97.30 and Zn: 18.91 (*YC-side product of phosphate fertilizer*)

Dari semua karakteristik yang diperoleh untuk berbagai sampel *yellow cake* menunjukkan masing-masing mempunyai karakteristik yang berbeda. Perbedaan karakteristik tersebut merupakan karakteristik *signature* (sidik jari) yang dimiliki oleh *yellow cake* tertentu. Berikutnya disampaikan rangkuman data konsentrasi uranium, isotop uranium dan kandungan unsur atau elemen dalam *yellow cake* yang ditampilkan dalam Tabel-V sampai dengan Tabel-VII.

Tabel-V. Konsentrasi uranium dalam *Yellow Cake*

Yellow Cake	% U
YC-Kalimantan	56,3
<i>YC-side product of phosphate fertilizer</i>	50 - 60
YC-COGEMA	76,23

Tabel-VI. Perbandingan isotop uranium dalam *Yellow Cake*

Yellow Cake	$^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$	$^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$
YC-Kalimantan	0,00555	0,00013258
<i>YC-side product of phosphate fertilizer</i>	0,0064	0,000055823
YC-COGEMA	-	-

Tabel-VII. Perbandingan kandungan elemen dalam *Yellow Cake*

Unsur	YC-Kalimantan, %	YC-side product of phosphate fertilizer, %	YC-COGEMA, %
Ag	-	0,047	0,14
Al	-	3,97	2,75
B	-	0,3	0,3
C	-	100	100
Ca	-	75,34	53,73
Cd	-	0,07	0,05
Cl	-	15	15

Co	-	0,81	0,80
Cr	-	3,81	3,15
Cu	-	1,19	1,36
Dy	-	0,15	0,15
F	-	10	10
Fe	-	18,53	48,68
Gd	-	0,5	0,5
Mg	-	25,12	25,57
Mn	-	3,82	3,63
Mo	-	23,67	10,92
H	-	80	80
Ni	-	1,86	2,58
Pb	-	0,72	0,75
Si	-	31,90	24,95
Sn	-	6,32	10,03
V	-	97,30	101,95
Zn	-	18,91	3,62

Pada analisis karakteristik yang dilakukan untuk *yellow cake* tidak semuanya dapat dilakukan karena terbatas kemampuan alat yang dimiliki. Analisis isotop stabil dan pengukuran radionuklida turunan uranium tidak bisa dilakukan karena harus menggunakan Spektrometer Massa yang tidak dipunyai oleh PTBBN.

KESIMPULAN

Pada tahun 2015 telah dilakukan identifikasi dan karakterisasi bahan nuklir yang di Batan yaitu batuan uranium dan *yellow cake*. Data karakteristik yang dihasilkan dapat dipakai sebagai masukan awal untuk database perpustakaan forensik nuklir. Masih ada beberapa data yang belum dapat dikumpulkan karena terbatas oleh peralatan yang dimiliki, namun secara umum kita sudah mempunyai metoda dan peralatan yang digunakan untuk pengukuran/pengujian/analisis batuan uranium dan *yellow cake*. Diharapkan PTBBN dapat meningkatkan fasilitas dan alat analisisnya untuk mendukung kegiatan nuklir forensik yang sangat penting untuk mendukung keamanan nuklir di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

1. A. Redermeier, *Fingerprinting of Nuclear Material for Nuclear Forensics*, ESARDA BULLETIN, No. 43, December 2009, Vienna University of Technology, ATOMINSTITUT, Bahnhofstase 46, 2231 Strasshof, Austria.

2. ANONIM, *Development of A National Nuclear Forensics Library*, IAEA NUCLEAR SECURITY SERIES NO. XX, NST018, Draft, February 2013.
3. ANONIM, *Nuclear Forensics Support, Technical Guidance Reference Manual*, IAEA Nuclear Security Series No. 2, IAEA Vienna, 2006.
4. ANONIM, *Nuclear Forensics in Support of Investigations*, IAEA NUCLEAR SECURITY SERIES NO. XX, NST014, Draft, February 2013.
5. D. Heater, M. Wayne, L.M. Stephen, B. Marcia, *Overview of National Nuclear Forensics Libraries*, Los Alamos National Laboratory, National Nuclear Security Administration, US Department of Energy.
6. <http://www.nss2016.org/document-center-docs/2016/4/1/joint-statement-on-forensics-in-nuclear-security>.