

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/urania/>



KARAKTERISASI KANDUNGAN URANIUM DAN UNSUR JEJAK PELET SINTER UO_2 UNTUK FORENSIK NUKLIR

Torowati¹, Ngatijo¹, Rahmiati¹, Deni Mustika¹, Erilia Yusnitha¹, Tri Yulianto¹, Jan Setiawan¹

¹Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN

Kawasan PUSPIPTEK Serpong Gd. 65, Tangerang Selatan, Banten 15314

e-mail: torowati@batan.go.id

(Naskah diterima: 22–12–2020, Naskah direvisi: 22–01–2021, Naskah disetujui: 26–02–2021)

ABSTRAK

KARAKTERISASI KANDUNGAN URANIUM DAN UNSUR JEJAK PELET SINTER UO_2 UNTUK FORENSIK NUKLIR. Forensik nuklir merupakan salah satu alat yang penting didalam keamanan nuklir terkait dengan penegakan hukum. Hal ini dikarenakan keberadaan bahan nuklir dan radioaktif memiliki potensi bahaya baik dari segi keselamatan, kesehatan hingga ancaman dalam keamanan nuklir. Didalam forensik nuklir, sidik jari adalah karakteristik bahan nuklir dan radioaktif untuk memberi informasi asal-usul suatu bahan nuklir sehingga diharapkan mempunyai data-data dari bahan nuklir dan radioaktif. Data-data diperoleh dari hasil karakterisasi berupa pengujian baik pengujian secara fisika ataupun kimia. Pengujian secara fisika seperti pengamatan visual, dimensi, fasa sedangkan secara kimia antara lain penentuan unsur bahan nuklir, penentuan konsentrasi unsur–unsur dalam bahan nuklir. Dalam makalah ini telah dilakukan pengujian kandungan uranium dan unsur jejak dalam bahan nuklir pelet uranium oksida (UO_2) dengan tujuan untuk sidik jari dalam mendukung forensik nuklir yang ada di PTBBN, BATAN. Pengujian kandungan uranium dilakukan secara titrasi potensiometri sedangkan pengujian unsur jejak selain uranium dengan metode spektrofotometri serapan atom. Hasil rerata pengujian kandungan uranium dalam bahan nuklir dan radioaktif tersebut diperoleh antara 87% sampai 88% hal ini menginformasikan bahwa bahan tersebut adalah bahan nuklir UO_2 . Hasil pengujian kandungan unsur jejak selain uranium dalam pengujian ini berbeda pengayaan maka kandungan unsur jejaknya berbeda pula, sehingga dapat menginformasikan tentang tingkat pengayaan uranium yang dimiliki oleh pellet UO_2 tersebut. Data-data tersebut dapat digunakan sebagai sidik jari dalam forensik nuklir sehingga dapat membantu penyidik dalam indentifikasi pada forensik nuklir apabila terjadi penyelewengan atau penyalahgunaan dari jenis bahan nuklir tersebut.

Kata kunci: Uranium, pelet sinter, sidik jari, forensik nuklir.

ABSTRACT

URANIUM CONTENT AND TRACING ELEMENTS CHARACTERIZATION OF UO_2 PELLETS FOR NUCLEAR FORENSICS. Nuclear forensics is one of the important tools in nuclear security related to law enforcement. Nuclear materials and radioactive materials have potential hazards in terms of safety, health, up to threats to the nuclear security. In nuclear forensics, fingerprints are the characteristics of nuclear materials and radioactive materials which provide information on the origins of the nuclear materials, from where data of nuclear materials and radioactive materials are expected to be collected. The data can be obtained from characterization by physical and chemical testing. The physical tests include visual observations, dimensions, and phases while chemical tests cover elemental analysis of the nuclear materials and analysis of elements concentration in the nuclear materials. In this study, analysis of uranium and trace elements contents in uranium dioxide pellets was carried out in PTBBN - BATAN with the purpose to collect the fingerprint for nuclear forensics. The analysis of uranium content was conducted by potentiometric titration and the trace elements content was analyzed by atomic absorption spectrophotometric method. The results show that uranium content of the nuclear materials tested has the average results from 87% to 88%, indicating that the materials are UO_2 . The analysis of trace elements content was done to UO_2 of varied enrichment level and the results show that the trace elements are not similar, which informs about the level of enrichment of the uranium dioxide pellets. These data can be used as fingerprint for nuclear forensics that can assist the investigators in the identification of nuclear forensics when misuse of nuclear materials occurs.

Keywords: Uranium, sintered pellets, fingerprint, nuclear forensics.

PENDAHULUAN

Forensik nuklir merupakan disiplin ilmu analitik yang berkembang pada tahun 1990 sebagai bentuk respon dari adanya kejadian penyelundupan bahan nuklir [1]. Teknik analitik dalam forensik nuklir dilakukan untuk mengidentifikasi asal usul bahan nuklir dan bahan radioaktif. Identifikasi atau penelusuran asal bahan tersebut bertujuan untuk meningkatkan proteksi fisik dan mencegah kejadian/penyalahgunaan bahan nuklir dan bahan radioaktif di masa depan. Forensik nuklir merupakan salah satu instrumen penting dalam sistem keamanan nuklir, terutama terkait dengan aspek penegakan hukum. Keberadaan bahan nuklir dan bahan radioaktif tersebut memiliki potensi bahaya baik dari segi keselamatan, kesehatan hingga ancaman dalam keamanan nuklir [2,3].

Ancaman keamanan nuklir bukan saja dapat terjadi di negara pemanfaat bahan nuklir dan radioaktif, tetapi dapat juga mengancam setiap negara manapun. Transportasi bahan nuklir dan radioaktif sangat berpotensi menjadi ancaman keamanan nuklir yang harus diwaspadai oleh setiap negara. Oleh karena itu setiap negara harus peduli terhadap keamanan nuklir dan melalui forensik nuklir, sistem keamanan bahan nuklir dan radioaktif yang dimiliki suatu negara dapat ditingkatkan. Indonesia sebagai pemanfaat bahan nuklir dan radioaktif untuk tujuan damai dengan posisi geografis yang berada di jalur transportasi perdagangan dunia, harus sadar akan pentingnya menjaga keamanan nuklir. Kegiatan forensik nuklir dapat membantu dalam melakukan investigasi hilangnya bahan nuklir yang dapat menjadi ancaman terhadap keamanan nuklir, dan mampu melakukan verifikasi terhadap bahan nuklir dan radioaktif di luar kendali badan pengawas. Peran forensik nuklir antara lain meningkatkan respon dalam menghadapi kejadian yang terkait dengan keamanan nuklir. Forensik nuklir ini dapat digunakan untuk mendukung penyelidikan tindak kriminal [4]. Perangkat yang menjadi kekuatan forensik nuklir adalah kemampuan analisis dan yang tidak kalah pentingnya adalah basis data sidik jari bahan nuklir dan radioaktif. Sidik jari ini merupakan karakteristik yang mampu memberikan informasi unik yang nantinya akan bermuara pada diketahui mengenai asal usulnya. Informasi ini akan digunakan untuk mendukung dalam penyelidikan suatu tindak kriminal yang melibatkan bahan nuklir dan radioaktif.

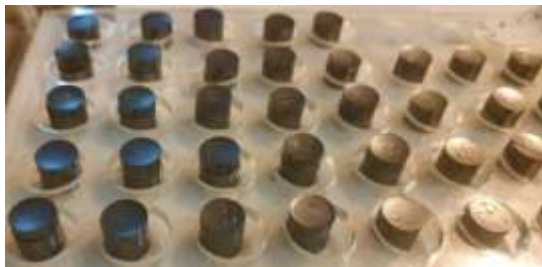
Pentingnya basis data sidik jari bahan nuklir dan radioaktif ini menjadi keunggulan

bagi suatu negara. Kegiatan pengumpulan data karakteristik sehingga menjadi suatu basis data menjadi suatu keharusan. Data karakterisasi bahan nuklir dan radioaktif yang dilakukan meliputi pengujian secara fisika dan kimia. Pengujian secara fisika antara lain seperti pengamatan visual, dimensi, isotop dan lainnya, sedangkan secara kimia antara lain penentuan unsur radioaktif, penentuan konsentrasi unsur jejak selain radioaktif [4].

Pemanfaatan bahan nuklir untuk keperluan bahan bakar nuklir dilakukan oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), tepatnya Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN). Kegiatan mengumpulkan informasi dan melakukan karakterisasi bahan nuklir untuk keperluan basis data forensik nuklir dimulai dari bahan nuklir dan radioaktif yang dimiliki oleh PTBBN, kemudian ke pusat lain di BATAN dan seluruh bahan nuklir dan radioaktif di Indonesia. Salah satu litbang di PTBBN adalah fabrikasi elemen bakar nuklir untuk reaktor daya dengan bahan utama bahan bakar nuklirnya berupa pelet sinter UO_2 . Pada saat ini litbang fabrikasi bahan bakar nuklir selain menggunakan uranium alam juga dikembangkan menggunakan uranium dengan tingkat pengayaan antara 2% hingga 5%. Pengayaan yang digunakan pada litbang PTBBN ini sesuai dengan pengayaan yang dibutuhkan untuk bahan bakar reaktor nuklir komersial seperti di Amerika yang menggunakan pengayaan sebesar 3 % hingga 5 % [1,5]. Spano dkk [5] membandingkan UO_2 alam kandungan U^{235} 0,71% berasal dari penambangan Afrika Selatan dengan UO_2 diperkaya 3,98% untuk tujuan membedakan karakteristik unik antara uranium alam dengan uranium yang telah mengalami pengayaan, mendapatkan informasi asal geologi dan sejarah proses, serta sebagai data untuk keperluan investigasi forensik di masa depan. Pada makalah ini difokuskan melakukan karakterisasi berupa pengujian/analisis secara kimia (merusak) yaitu pengujian kandungan uranium dan unsur jejak selain uranium yang terkandung dalam pelet UO_2 hasil sinter tersebut [1-3]. Pengujian kandungan uranium dilakukan secara titrasi potensiometri menggunakan potensiometer T-90 sedangkan pengujian unsur jejak dalam pelet UO_2 hasil sinter dilakukan secara spektrofotometri serapan atom (AAS). Dari pengujian ini diharapkan dapat diketahui kandungan uranium dan unsur jejak dalam pelet UO_2 hasil sinter, sehingga data yang diperoleh dari pengujian dapat menambah basis data bahan nuklir dan radioaktif.

METODOLOGI

Bahan yang digunakan adalah adalah pelet UO_2 hasil sinter dengan pengayaan 2, 3, 4, dan 5%, dan pelet UO_2 alam hasil sinter dengan penambahan dopan Cr_2O_3 0,4%, seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Pelet UO_2 diperkaya hasil sinter.

Pengujian kandungan uranium yang dilakukan secara titrasi potensiometri mengacu pada metode Davies Gray. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui kandungan/kadar uranium dalam suatu bahan/sampel. Prinsip dasar pengujian uranium dengan titrasi potensiometri ini harus berada dalam bentuk larutan uranil nitrat yang penentuan kadar uraniumnya berdasarkan pada reaksi reduksi-oksidasi (redoks). Larutan uranium (uranil nitrat) dengan kandungan uranium masing-masing ± 10 g/L diambil dari pelet UO_2 sinter dengan cara melarutkan pelet UO_2 menggunakan HNO_3 . Masing-masing larutan uranil nitrat tersebut dimasukkan dalam labu ukur dan volum tertentu dan ditepatkan sampai tanda menggunakan air bebas mineral (ABM). Larutan uranil nitrat mengandung uranium dengan valensi (VI) akan direduksi menjadi uranium (IV) menggunakan larutan $FeSO_4$ 1 M sebagai reduktor. Sejumlah masing-masing 1 ml larutan uranil nitrat, diambil kemudian ditambahkan H_2SO_4 1 M dan dipanaskan hingga kusat. Tambahkan HNO_3 1 M dan larutan diaduk selama 45 menit. Selanjutnya, ditambah NH_2SO_3H 1,5 M dan H_3PO_4 85% dalam larutan dengan pengadukan hingga larutan yang semula bening berubah menjadi putih susu. Larutan ditambahkan $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ dan Mo (IV) dalam $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$ (0,4 %) sebagai katalisator dengan pengadukan sehingga larutan yang semula berwarna coklat berubah menjadi jernih. Larutan ditambahkan $VOSO_4 \cdot 2H_2O$ dilanjutkan dengan mengoksidasi Uranium (IV) yang terbentuk menggunakan larutan standar $K_2Cr_2O_7$ 0,0045 M menjadi uranium (VI). Jumlah uranium yang diuji dapat diketahui langsung dari pencatat hasil pada alat titrasi potensiometri tersebut atau dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [6,7]:

$$\text{Kadar uranium} = \frac{V_1 \times 119 \times N \times K}{E \times V_2} \times 100\% \quad (1)$$

dengan:

V_1 : Volum titran yang digunakan untuk pengujian (mL).

N : Normalitas $K_2Cr_2O_7$ yang digunakan adalah 0,027 N (N).

K : Volum labu takar yang digunakan untuk melarutkan bahan/sampel (mL).

E : Berat bahan/sampel yang dilarutkan (mg).

V_2 : Volum larutan bahan/sampel yang diuji (mL).

Langkah pengujian yang sama diulangi untuk masing-masing larutan uranium yang berbeda tingkat pengayaannya dengan 7 kali pengulangan.

Pengujian kandungan unsur jejak pada pelet UO_2 hasil sinter menggunakan AAS diharapkan dapat diperoleh nilai secara kuantitatif dengan kepekaan (sensitivitas) dan ketelitian serta selektivitas yang tinggi. Penyiapan sampel dimulai dengan penimbangan dan dilarutkan menggunakan HNO_3 , kemudian dimasukkan dalam labu ukur dan volum ditepatkan sampai tanda menggunakan ABM. Selanjutnya dilakukan ekstraksi menggunakan campuran TBP:hexana dengan perbandingan volum 1:1. Larutan fase air dipisahkan kemudian dilakukan pengukuran kandungan unsur jejaknya menggunakan spektrofotometer serapan atom. Hasil kandungan unsur jejak yang dianalisis dapat langsung diketahui dari keluaran alat AAS tersebut dan dalam satuan ppm (mg/L). Apabila bahan yang dianalisis dalam bentuk padat maka kandungan unsur jejak yang dianalisis dapat dihitung menggunakan persamaan berikut [8-10]:

$$\text{Kandungan unsur} = \frac{A \times V_s}{E} \quad (2)$$

dengan :

A : Kandungan unsur data hasil keluaran alat (ppm), ($\mu\text{g/mL}$).

V_s : Volum labu takar yang digunakan untuk menepatkan bahan/sampel (mL).

E : Berat bahan/sampel yang dilarutkan (g).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Informasi mengenai sidik jari bahan nuklir sangat diperlukan dalam forensik nuklir dalam rangka mengungkapkan asal usul bahan nuklir. Informasi tersebut mendukung dalam penyelidikan suatu tindak kriminal yang berhubungan dengan bahan nuklir dan radioaktif. Pengujian ini telah memperoleh

kandungan/kadar uranium dalam pelet UO_2 hasil sinter secara titrasi potensiometri dan pengujian kandungan unsur jejak selain uranium menggunakan spektrofotometri serapan atom.

Karakterisasi seperti pengujian kandungan uranium dan unsur jejak dalam pelet UO_2 hasil sinter diperlukan disamping untuk keperluan litbang fabrikasi elemen

bakar nuklir untuk reactor daya juga untuk menambah data sidik jari dalam basis data forensik nuklir yang ada di PTBBN, BATAN. Pengujian kandungan uranium telah dilakukan dalam pelet UO_2 hasil sinter dengan tingkat pengayaan dari 2%, 3%, 4%, 5% dan pelet $UO_2 + Cr_2O_3$ 0,4% hasil sinter. Data hasil pengujian uranium seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil pengujian uranium dalam pelet UO_2 hasil sinter.

No	Tingkat pengayaan pelet UO_2 hasil sinter yang diuji (%)	Hasil rerata kandungan uranium \pm SD (%)
1	2,015	88,07 \pm 0,60
2	2,992	88,10 \pm 0,22
3	3,980	87,48 \pm 0,45
4	4,953	88,10 \pm 0,70
5	alam + dopan Cr_2O_3 0,4%	87,94 \pm 0,23

Dari Tabel 1 terlihat bahwa hasil pengujian kandungan uranium dalam pelet UO_2 hasil sinter secara keseluruhan tidak terlihat perbedaan yang signifikan. Pada pelet UO_2 dengan pengayaan 2,992% dan 4,953% mempunyai nilai yang sama yaitu 88,10%. Namun demikian, hasil kandungan uranium tersebut menjadi acuan bahwa bahan yang diuji adalah bahan nuklir berupa UO_2 dengan indikator memiliki kandungan uraniumnya >87%[11]. Untuk menajamkan tentang karakteristik/perbedaan dari masing-masing bahan nuklir UO_2 tersebut perlu dilakukan pengujian lain seperti kandungan unsur jejak dalam bahan nuklir UO_2 dengan hasil uji ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2 menunjukkan bahwa UO_2 diperkaya tidak mengandung Ag, Al, Ca, Cd, Co, Pb dan Sn. Unsur-unsur ini dapat membedakan UO_2 diperkaya dengan yang tidak diperkaya. Namun disayangkan untuk membedakan pengayaan dari pelet UO_2 tidak bisa dibedakan dari unsur pengotor. Namun dari beberapa unsur tersebut terlihat pola untuk unsur Cr, Ni, dan Si pada pelet UO_2 dengan pengayaan 2% bernilai lebih rendah dibandingkan pada pengayaan 3%, begitu juga pada pelet UO_2 dengan pengayaan 4% bernilai lebih rendah dibandingkan pada pengayaan 5%.

Spano dkk [5] menyatakan bahwa unsur Ca, V, Fe, Cr, Co, Ni, Cu, Sr, Zr, Nb, Mo, Sn, Sb, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Yb, W, Pb, Bi dan Th ada didalam kedua sampel UO_2 alam dan diperkaya 3,98% dengan konsentrasi 0,03 – 3,4 μ g/g. Hasil pengujian unsur selain uranium dalam pelet UO_2 diperkaya 3,98% dan pelet UO_2 alam+ dopan Cr_2O_3 0,4% dibandingkan dengan hasil

pengujian yang dilaporkan Spano dkk [5] dapat dilihat pada Tabel 3 dan Tabel 4.

Tabel 3 menunjukkan bahwa hasil pengujian unsur untuk pelet UO_2 diperkaya 3,98% memiliki jumlah yang hampir sama dengan referensi Spano dkk [5] kecuali untuk unsur Fe, Pb, Sn dan Zn. Perbedaan kandungan unsur selain uranium dalam pelet UO_2 diperkaya 3,98% ini menunjukkan meskipun sama-sama memiliki pengayaan 3,98% namun memiliki sidik jari masing-masing. Adanya perbedaan kandungan unsur-unsur dalam UO_2 yang dimiliki PTBBN dengan hasil dari referensi disebabkan antara lain adanya perbedaan proses pengujian, alat analisis yang digunakan, asal geologi bahan baku dan sejarah proses menjadi UO_2 .

Pelet UO_2 alam dengan tambahan dopan Cr_2O_3 0,4% jika dibandingkan dengan UO_2 alam referensi Spano dkk [5] terdapat perbedaan jumlah kandungan unsur Cr yang signifikan karena unsur Cr sengaja ditambahkan namun untuk unsur yang lain seperti Ca, Fe, Mo, Pb dan Zn juga terlihat perbedaan yang dapat dilihat pada Tabel 4.

Dari perbandingan pengujian Tabel 3 dan Tabel 4, terlihat bahwa unsur Zn dapat dijadikan sebagai sidik jari unsur jejak pada pelet sinter UO_2 di PTBBN. Hasil pengujian unsur jejak selain uranium dalam pelet UO_2 tersebut akan sangat bermanfaat sebagai informasi sidik jari bahan nuklir UO_2 dalam basis data forensik nuklir. Hal ini dikarenakan dapat membedakan adanya perbedaan tingkat pengayaan uranium dari bahan nuklir pelet UO_2 hasil sinter. Kandungan uranium dan unsur jejak dalam pelet UO_2 sinter yang diperoleh dari pengujian ini dapat menambah data dalam basis data forensik nuklir.

Tabel 2. Hasil pengujian unsur jejak selain uranium dalam pelet UO_2 .

No	Unsur	Hasil pengujian unsur jejak dalam pelet UO_2 dengan basis uranium ($\mu\text{g/g}$)				
		diperkaya 2,015 %	diperkaya 2,992 %	diperkaya 3,980%	diperkaya 4,953%	alam+dopan Cr_2O_3 0,4%
1	Ag	< LD (0,002)	< LD (0,002)	< LD (0,002)	< LD (0,002)	0,197
2	Al	< LD (0,002)	< LD (0,002)	< LD (0,002)	< LD (0,002)	46,5186
3	Ca	< LD (0,002)	< LD (0,002)	< LD (0,002)	< LD (0,002)	68,5839
4	Cd	<LD (0,0003)	< LD (0,0003)	< LD (0,0003)	< LD (0,0003)	0,042
5	Co	< LD (0,007)	< LD (0,007)	< LD (0,007)	< LD (0,007)	0,253
6	Cr	3,285±0,011	6,171±1,657	1,864±0,178	12,705±1,093	995,583
7	Fe	48,133±1,814	87,461±4,26	32,073±0,103	12,705±1,093	14,585
8	Mg	9,861±0,843	18,795±0,843	45,516±3,410	8,637±0,662	15,506
9	Mn	0,676±0,047	1,175±0,057	0,395 ±0,062	1,219±0,037	2,063
10	Mo	< LD (0,030)	3,583±0,034	1,771±0,216	< LD (0,030)	< LD(0,030)
11	Ni	1,175±0,007	4,089±0,599	1,037±0,012	4,057±1,694	6,633
12	Pb	< LD (0,001)	< LD (0,001)	< LD (0,001)	< LD (0,001)	0,988
13	Si	22,245±3,636	34,964±3,771	15,223±1,233	57,798±12,145	24,055
14	Sn	< LD (0,031)	< LD (0,031)	< LD (0,031)	< LD (0,031)	6,618
15	Zn	2,476±0,484	2,407±0,044	39,873±12,080	69,699±3,606	9,278
16	V	< LD (0,050)	< LD (0,050)	< LD (0,050)	< LD (0,050)	< LD (0,050)

*LD : limit deteksi

Tabel 3. Perbandingan hasil pengujian unsur dalam pelet UO_2 diperkaya 3,98% terhadap referensi.

No.	Unsur	Hasil pengujian unsur jejak dalam pelet UO_2 dengan basis uranium ($\mu\text{g/g}$)	
		Diperkaya 3,980%	Diperkaya 3,98% [5]
1	Ca	< LD (0,002)	0,00589
2	Co	< LD (0,007)	0,04097
3	Cr	1,864±0,178	2,71580
4	Fe	32,073±0,103	0,07040
5	Mo	1,771±0,216	1,45341
6	Ni	1,037±0,012	1,05776
7	Pb	< LD (0,001)	0,01110
8	Sn	< LD (0,031)	0,55353
9	Zn	39,873±12,080	<LD (0,031376)
10	V	< LD (0,050)	0,04964

*LD : limit deteksi

Tabel 4. Perbandingan hasil pengujian unsur dalam pelet UO₂ alam+dopan Cr₂O₃ 0,4% terhadap UO₂ alam referensi.

No.	Unsur	Hasil pengujian unsur jejak dalam pelet UO ₂ dengan basis uranium (µg/g)	
		alam+dopan Cr ₂ O ₃ 0,4%	UO ₂ alam [5]
1	Ca	68,584	0,00845
2	Co	0,253	0,07241
3	Cr	995,583	3,46884
4	Fe	14,585	0,07743
5	Mo	< LD(0,030)	0,78826
6	Ni	6,633	1,41216
7	Pb	0,988	0,02524
8	Sn	6,618	1,53638
9	Zn	9,278	<LD (0,031376)
10	V	< LD (0,050)	

*LD : limit deteksi

SIMPULAN

Hasil pengujian kandungan uranium yang diperoleh kisaran nilainya diantara 87% sampai 88% sehingga dapat menginformasikan bahwa bahan tersebut adalah bahan nuklir UO₂. Hasil pengujian kandungan unsur jejak selain uranium dapat memberi informasi tentang tingkat pengayaan uranium dari bahan nuklir UO₂ tersebut. Data-data tersebut dapat digunakan sebagai sidik jari bahan nuklir sehingga dapat dimanfaatkan dalam forensik nuklir untuk membantu penyidik dalam mengidentifikasi temuan barang bukti yang diduga bahan nuklir. Aspek utama yang menentukan sidik jari UO₂ dari hasil pengujian ini adalah adanya perbedaan kandungan unsur-unsur tertentu (selain uranium) dalam UO₂ dengan pengayaan yang berbeda-beda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ibu Rr. Ratih Langenati, MT dan seluruh teman-teman kendali kualitas atas dukungannya dalam melakukan kegiatan hingga selesainya makalah ini. Kegiatan ini dapat terlaksana melalui pendanaan anggaran forensik nuklir dan kegiatan prototipe bahan bakar nuklir reaktor daya tahun 2019.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] K. Lützenkirchen, M. Wallenius, Z. Varga, T. Wiss, A. Knott, A. Nicholl, and K. Mayer, "Nuclear forensics on uranium fuel pellets," *Radiochimica Acta*, vol. 107, no. 7, pp. 635-643, 2019.
- [2] D. Apriliani, "Peran forensik nuklir dalam invesigasi kejadian keamanan nuklir di Indonesia," *Prosiding Seminar Keselamatan Nuklir 2014*, BAPETEN, 2014
- [3] P. D. Winastri, dkk. "Perancangan sistem informasi forensik nuklir," *Prosiding Hasil-Hasil Penelitian EBN Tahun 2015*, PTBBN, BATAN. 2015
- [4] B. Briyatmoko, dkk., "Identifikasi dan fingerprint batuan uranium," *Prosiding Hasil-Hasil Penelitian EBN Tahun 2015*, PTBBN, BATAN. 2015
- [5] T. L. Spano, A. Simonetti, L. Corcoran, P. A. Smith, S. R. Lewis, and P.C. Burns, "Comparative chemical and structural analyses of two uranium dioxide fuel pellets", *Journal of Nuclear Materials*, vol. 518, pp. 149 – 161, 2019.
- [6] Torowati, dkk., "Validasi metode untuk analisis kandungan uranium menggunakan potensiometer T- 90," *Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir*, PSTA, Surakarta, 2016
- [7] A. N. Nelwamondo, et. al, "Uranium assay and trace element analysis of the fourth collaborative material exercise samples by the modified Davies-Gray method and the ICP-MS/OES techniques," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 315, no. 2, pp.379-394, 2018.
- [8] Gunandjar, *Prinsip Analisis Spektrofotometri Serapan Atom (AAFS dan GTA-AAS)*, Diktat Coaching AAFS dan GTA-AAS, Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, BATAN, 2014
- [9] S. Carter, A. S. Fisher, M. W. Hinds, S. Lancaster, and J. Marshall, "Atomic spectrometry update. Review of advances in the analysis of metals, chemicals and materials," *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 28, no. 12, pp.1814-1869, 2013.

- [10] A. L. Souza, M. E. B. Cotrim, and M. A. F. Pires, "An overview of spectrometric techniques and sample preparation for the determination of impurities in uranium nuclear fuel grade," *Microchemical Journal*, vol. 106, pp.194-201, 2013.
- [11] Torowati, dkk, "Pelaksanaan kendali kualitas bahan bakar nuklir dan pengembangan metode analisis". In *Prosiding Seminar Hasil-hasil Penelitian EBN Tahun 2017*, PTBBN-BATAN, pp. 104-115, 2017.