POTENSI ENDAPAN Cs_2PtCl_6 HASIL ANALISIS *BURN-UP* BAHAN BAKAR NUKLIR U_3Si_2/Al SEBAGAI KANDIDAT SUMBER STANDAR RADIONUKLIDA ^{137}Cs

Arif Nugroho[1)], Komar Sutriah[2)], Sri Mulijani[2)], Triyono Basuki[3)], Hermawan Candra[4)], Juan Carlos Sihotang[1)], Ahmad Ade Rofiqi[2)]

[1]Pusat Riset Teknologi Bahan Nuklir Dan Limbah Radioaktif – BRIN Kawasan Sains dan Teknologi B.J Habibie Gd. 720, Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15314
[2]Departemen Kimia, Fakultas MIPA, IPB University Jl. Tanjung Kampus IPB, Dramaga, Bogor
[3]Pusat Riset Fotonika – BRIN Kawasan Sains dan Teknologi B.J Habibie Gd. 720, Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15314
[4]Pusat Riset Teknologi Keselamatan, Metrologi, dan Mutu Nuklir – BRIN Kawasan Sains dan Teknologi B.J Habibie Gd. 720, Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15314

E-mail: arif011@brin.go.id

Abstract

The availability of ^{137}Cs radionuclide reference sources in Indonesia remains highly dependent on imported products, resulting in high procurement costs and complex acquisition procedures. Meanwhile, Cs_2PtCl_6 precipitate generated from burn-up analysis of irradiated U_3Si_2/Al nuclear fuel still contains significant amounts of ^{137}Cs and has not been optimally utilized. This study aimed to evaluate the potential of Cs_2PtCl_6 precipitate as a candidate material for ^{137}Cs radionuclide reference sources by optimizing chloroplatinate precipitation conditions and characterizing the resulting material. Precipitation was optimized by varying temperature and precipitation time, followed by characterization using X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive spectroscopy (SEM-EDS), and gamma spectrometry. The optimum condition was obtained at −3 °C for 10 min, producing single-phase Cs_2PtCl_6 based on XRD analysis. SEM-EDS revealed well-defined crystal morphology and homogeneous distributions of Cs, Pt, and Cl. Gamma spectrometry showed an average ^{137}Cs recovery of 96.39%, higher than the approximately 70% obtained using the previous method. These results demonstrate that Cs_2PtCl_6 precipitate has strong potential as a candidate material for ^{137}Cs radionuclide reference sources and provides an opportunity to increase the value of radioactive waste generated from burn-up analysis.

Keywords: *^{137}Cs; Cs_2PtCl_6; chloroplatinate precipitation; radionuclide reference source; irradiated U_3Si_2/Al nuclear fuel; radioactive waste valorization.*

Abstrak

Ketersediaan sumber standar radionuklida ^{137}Cs di Indonesia masih bergantung pada produk impor dengan biaya pengadaan tinggi dan prosedur yang kompleks. Sementara itu, endapan Cs_2PtCl_6 hasil analisis *burn-up* bahan bakar nuklir U_3Si_2/Al pasca iradiasi masih mengandung ^{137}Cs dalam jumlah signifikan dan belum dimanfaatkan secara optimal. Penelitian ini bertujuan mengkaji potensi endapan Cs_2PtCl_6 sebagai kandidat bahan sumber standar radionuklida ^{137}Cs melalui optimasi kondisi pengendapan kloroplatinat dan karakterisasi material yang dihasilkan. Optimasi dilakukan dengan memvariasikan temperatur dan waktu pengendapan, kemudian material dikarakterisasi menggunakan *X-ray diffraction* (XRD), *scanning electron microscopy-energy dispersive spectroscopy* (SEM-EDS), dan spektrometri gamma. Kondisi optimum diperoleh pada temperatur −3 °C selama 10 menit dan menghasilkan Cs_2PtCl_6 fase tunggal berdasarkan analisis XRD. Karakterisasi SEM-EDS

menunjukkan morfologi kristal yang teratur serta distribusi unsur Cs, Pt, dan Cl yang homogen. Analisis spektrometri gamma menunjukkan recovery ^{137}Cs rata-rata sebesar 96,39%, lebih tinggi dibandingkan metode sebelumnya yang mencapai sekitar 70%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa endapan Cs_2PtCl_6 berpotensi dikembangkan sebagai bahan sumber standar radionuklida ^{137}Cs sekaligus meningkatkan nilai tambah limbah radioaktif hasil analisis *burn-up.*

Kata kunci: ^{137}Cs; Cs_2PtCl_6; pengendapan kloroplatinat; sumber standar radionuklida; bahan bakar nuklir U_3Si_2/Al pasca iradiasi; pemanfaatan limbah radioaktif.

PENDAHULUAN

Pusat Riset Teknologi Bahan Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTBNLR)-ORTN telah mengembangkan bahan bakar nuklir U_3Si_2/Al yang digunakan pada Reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy (RSG-GAS). Selama iradiasi, reaksi fisi menghasilkan berbagai isotop, termasuk ^{137}Cs, yang dapat digunakan sebagai salah satu indikator dalam penentuan *burn up* bahan bakar. Evaluasi *burn up* merupakan bagian penting dalam *Post Irradiation Examination* (PIE) untuk mengetahui unjuk kerja dan integritas bahan bakar nuklir selama digunakan di dalam reaktor [1,2].

Analisis *burn up* secara kimia menghasilkan larutan sisa pengujian dengan aktivitas radioaktif tinggi yang masih mengandung ^{137}Cs dengan waktu paruh 30,17 tahun serta radionuklida berumur panjang lainnya. Kondisi tersebut menyebabkan larutan sisa belum dapat langsung dilimbahkan dan masih harus disimpan di *hot cell*. Di sisi lain, ^{137}Cs merupakan radionuklida pemancar gamma yang dibutuhkan sebagai sumber standar untuk kalibrasi berbagai instrumen radiasi. Ketersediaan sumber standar ^{137}Cs di Indonesia masih bergantung pada produk impor dengan biaya pengadaan dan persyaratan transportasi yang tinggi [3,4].

Berbagai metode pemisahan ^{137}Cs telah dikembangkan, antara lain pengendapan $CsClO_4$ serta pertukaran kation menggunakan zeolit Lampung dan resin Dowex, dengan *recovery* masing-masing mencapai 98,01 ± 1,11%, 99,03 ± 0,10%, dan 98,67 ± 0,30%. Meskipun memberikan *recovery* tinggi, metode tersebut masih memiliki keterbatasan sehingga pengendapan kloroplatinat menggunakan H_2PtCl_6 menjadi alternatif yang perlu dikembangkan. Metode ini menghasilkan Cs_2PtCl_6 yang relatif stabil dan berpotensi menghasilkan produk dengan kemurnian tinggi. Penelitian sebelumnya belum dapat memastikan kemurnian endapan Cs_2PtCl_6 secara optimal karena sampel pasca iradiasi yang digunakan telah mengalami kehilangan beberapa radionuklida akibat peluruhan.

Oleh karena itu, diperlukan optimasi kondisi pengendapan serta evaluasi karakteristik material yang dihasilkan [5].

Penelitian ini bertujuan mengoptimalkan pemisahan ^{137}Cs dari bahan bakar U_3Si_2/Al pasca iradiasi menggunakan metode pengendapan kloroplatinat melalui variasi temperatur dan waktu pengendapan. Endapan Cs_2PtCl_6 yang diperoleh kemudian dikarakterisasi menggunakan XRD dan SEM-EDS serta dianalisis menggunakan spektrometri gamma untuk menentukan efisiensi pemisahan ^{137}Cs. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan dasar pengembangan endapan Cs_2PtCl_6 sebagai kandidat bahan sumber standar radionuklida ^{137}Cs sekaligus meningkatkan pemanfaatan radionuklida dari hasil samping analisis *burn up*.

METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental untuk mengoptimalkan pemisahan ^{137}Cs melalui pembentukan endapan Cs_2PtCl_6 dari larutan hasil analisis *burn-up* bahan bakar nuklir U_3Si_2/Al. Sampel terdiri atas PEB U_3Si_2/Al pra-iradiasi dan PEB pasca-iradiasi kode SIBU60 EBU CBBJ 250 dengan densitas 4,8 gU/cm³. Variabel bebas berupa temperatur (−11, −3, dan 20 °C) dan waktu pengendapan (5, 10, dan 30 menit), sedangkan variabel terikat meliputi recovery ^{137}Cs serta karakteristik endapan berdasarkan fase kristal, morfologi, dan komposisi unsur. Kondisi preparasi lainnya dipertahankan tetap.

Peralatan yang digunakan meliputi peralatan gelas, *hotplate*, oven, corong Buchner, penangas es, X-Ray Diffraction (XRD) Panalytical, spektrometer gamma Genie 2000 dengan detektor HPGe, serta SEM Phenom Pharos Thermo Scientific yang dilengkapi *Energy Dispersive Spectrometer* (EDS). Bahan yang digunakan meliputi PEB U_3Si_2/Al pra- dan pasca-iradiasi, HCl, HNO_3, larutan standar Sm, Cs, Sr, dan Nd, $CsNO_3$ *carrier*, Fe, NaOH, indikator *methyl red*, H_2PtCl_6, etanol, dan akuades.

Sebanyak 0,067 g PEB pra-iradiasi dilarutkan dengan 5 mL HCl 6 M dan 5 mL HNO_3 6 M. Sebanyak 100 µL larutan digunakan sebagai sampel dan ditambahkan larutan standar Sm, Cs, Sr, dan Nd 1100 ppm untuk mensimulasikan larutan PEB pasca-iradiasi. Sampel kemudian diproses melalui pengendapan menggunakan $CsNO_3$ *carrier*, Fe, dan NaOH. Endapan dipisahkan dengan corong Buchner, sedangkan supernatan diproses kembali melalui pengaturan keasaman menggunakan HCl dan indikator methyl red,

diikuti penambahan Fe dan NaOH. Larutan hasil pemisahan kemudian diasamkan hingga berwarna merah dan direaksikan dengan 2 mL H_2PtCl_6 [6][7].

Optimasi pembentukan Cs_2PtCl_6 dilakukan pada temperatur −11, −3, dan 20 °C dengan waktu pengendapan 5, 10, dan 30 menit. Endapan dipisahkan, dicuci menggunakan akuades dan etanol, kemudian dikeringkan. Kondisi optimum ditentukan berdasarkan *recovery* ^{137}Cs dan karakteristik endapan.

Untuk sampel pasca-iradiasi, PEB kode SIBU60 EBU CBBJ 250 dicuplik pada posisi *top* (T1 = 0,063 g; T2 = 0,050 g), *middle* (M1 = 0,040 g), dan *bottom* (B1 = 0,036 g; B2 = 0,037 g). Masing-masing sampel dilarutkan dengan 5 mL HCl 6 M dan 5 mL HNO_3 6 M. Sebanyak 1 mL larutan dikeluarkan dari *hot cell* 109 dan diencerkan dengan akuades hingga 20 mL sebagai larutan induk [8]. Sebanyak 100 µL larutan induk diproses menggunakan 100 mg $CsNO_3$ carrier, 20 mL air deionisasi, Fe, dan NaOH. Endapan hasil pemisahan dipisahkan dan dikeringkan, sedangkan larutan yang tersisa diasamkan dengan HCl dan direaksikan dengan 2 mL H_2PtCl_6 pada penangas es selama 10 menit. Endapan Cs_2PtCl_6 dipisahkan, dicuci dengan air deionisasi dan etanol, kemudian dikeringkan pada 25 °C.

Kandungan ^{137}Cs pada endapan dan supernatan dianalisis menggunakan spektrometer gamma Genie 2000 dengan detektor HPGe selama 500 detik. *Recovery* ^{137}Cs dihitung berdasarkan perbandingan aktivitas ^{137}Cs pada endapan Cs_2PtCl_6 terhadap aktivitas ^{137}Cs pada sampel awal. Karakteristik endapan dianalisis menggunakan SEM-EDS pada perbesaran 500 – 10.000 kali untuk menentukan morfologi dan komposisi unsur. Identifikasi fase kristal dilakukan menggunakan XRD dengan anoda Cu, panjang gelombang 1,54 Å, *step size* 0,0200°, dan rentang 2θ 20–80°. Data XRD dianalisis menggunakan metode Rietveld dengan perangkat lunak HighScore [9].

HASIL DAN PEMBAHASAN

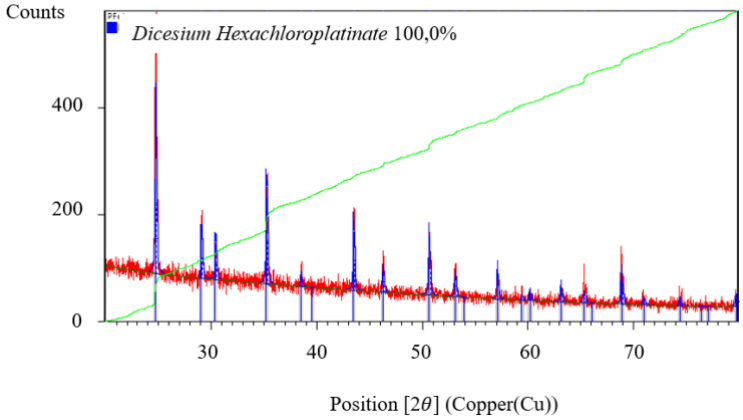
Hasil penelitian menunjukkan kondisi temperatur dan waktu pengendapan berpengaruh terhadap pembentukan endapan Cs_2PtCl_6. Pada variasi temperatur −11, −3, dan 20 °C, massa endapan rata-rata berturut-turut sebesar 0,2798; 0,3843; dan 0,2628 g. Temperatur −3 °C menghasilkan massa endapan tertinggi. Sementara itu, variasi waktu pengendapan 5, 10, dan 30 menit menghasilkan massa endapan rata-rata masing-masing sebesar 0,2975; 0,3361; dan 0,3063 g, dengan massa tertinggi diperoleh pada waktu 10

menit. Berdasarkan hasil tersebut, kondisi −3 °C selama 10 menit dipilih sebagai kondisi optimum untuk proses pengendapan Cs_2PtCl_6. (Tabel 1) Peningkatan massa endapan pada temperatur rendah diduga berkaitan dengan penurunan kelarutan Cs_2PtCl_6, sedangkan waktu pengendapan 10 menit menunjukkan pembentukan endapan telah berlangsung secara efektif pada kondisi tersebut [10].

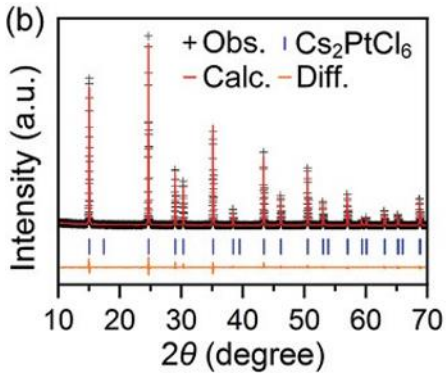
Tabel 1 Pengaruh variasi temperatur dan waktu pengendapan terhadap bobot Cs_2PtCl_6

Variabel	Kondisi	Massa rata-rata (g)
Temperatur	−11 °C	0,2798
	−3 °C	0,3843
	20 °C	0,2628
Waktu	5 menit	0,2975
	10 menit	0,3361
	30 menit	0,3063

Karakterisasi XRD terhadap endapan yang diperoleh pada kondisi optimum menunjukkan pola difraksi yang sesuai dengan Cs_2PtCl_6. Puncak-puncak difraksi utama pada rentang 2θ 20–80° menunjukkan kesesuaian dengan pola referensi Cs_2PtCl_6. Hasil identifikasi menggunakan perangkat lunak HighScore menunjukkan *reference code* 98-002-6709 dengan skor 67, *displacement* 0,000 dan *scale factor* 0,605, serta formula kimia Cl_6Cs_2Pt. Tidak teridentifikasi fase kristalin lain yang signifikan pada pola yang dianalisis, sehingga Cs_2PtCl_6 dapat dinyatakan sebagai fase utama hasil pengendapan (Gambar 1). Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian lain yang melakukan sintesis Cs_2PtCl_6 sebagai perovskit, menghasilkan pola difraksi yang serupa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 [11].

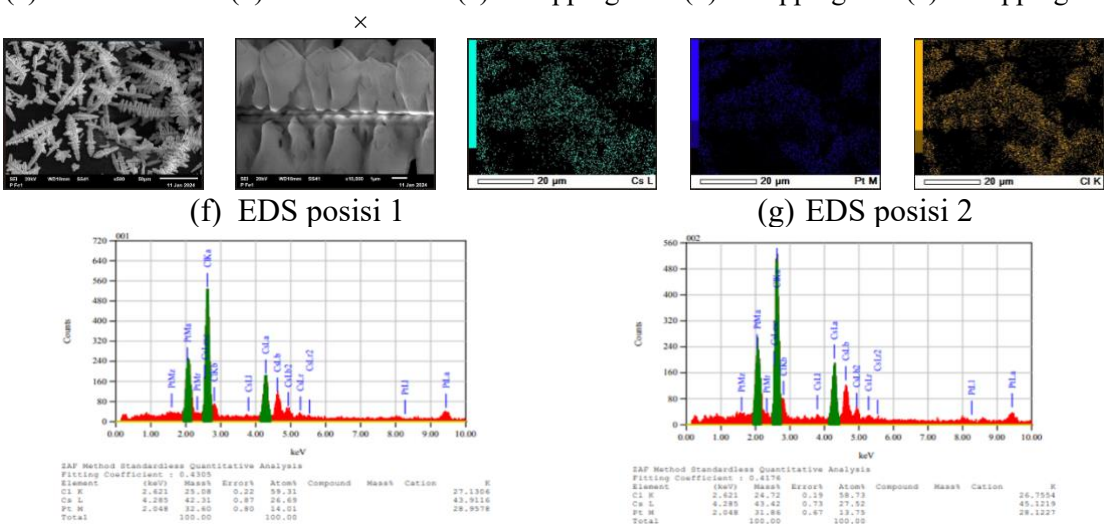


Gambar 1 Pola Difraksi Sinar X (XRD) dari Cs_2PtCl_6



Gambar 2 Pola difraksi Cs_2tCl_6 rujukan [12]

Hasil karakterisasi SEM menunjukkan bahwa endapan Cs_2PtCl_6 memiliki morfologi partikel berbentuk prisma dengan ukuran yang bervariasi. Analisis *elemental mapping* menunjukkan bahwa unsur Cs, Pt, dan Cl terdistribusi secara merata pada partikel. Hasil EDS juga mengonfirmasi keberadaan ketiga unsur tersebut, dengan komposisi massa Cs sebesar 42,30–43,42%, Pt sebesar 32,60–31,86%, dan Cl sebesar 24,72–25,08% (Gambar 3). Komposisi tersebut menunjukkan keberadaan unsur-unsur penyusun Cs_2PtCl_6 dan mendukung hasil identifikasi fase menggunakan XRD.



Gambar 3 Karakterisasi morfologi dan komposisi unsur endapan Cs_2PtCl_6 menggunakan SEM-EDS: (a) morfologi pada perbesaran 500×, (b) morfologi pada perbesaran 10.000×, (c–e) distribusi elemental mapping Cs, Pt, dan Cl, serta (f–g) spektrum EDS pada posisi 1 dan 2.

Efektivitas metode ini dapat dijelaskan lebih lanjut oleh proses nukleasi dan pertumbuhan kristal yang dipengaruhi oleh konsentrasi ion Pt dan Cs, serta kondisi temperatur dan waktu pengendapan [13]. Partikel-partikel yang teramati menggunakan SEM juga mencerminkan kestabilan termal dari endapan, yang penting untuk memastikan integritas struktural selama analisis isotop [14].

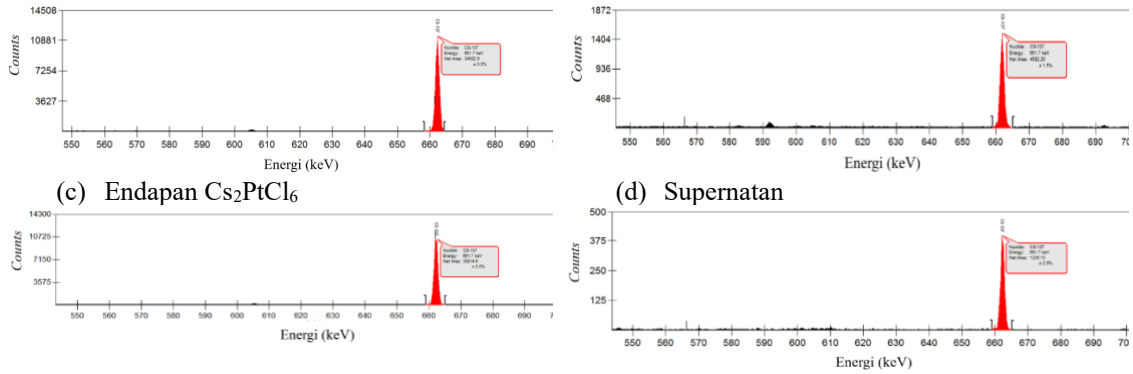
Penelitian yang dilakukan oleh [15] menunjukkan hasil serupa, di mana distribusi Cs yang merata penting untuk memastikan keakuratan dalam pengumpulan isotop ^{137}Cs. Distribusi homogen ketiga unsur ini menginterpretasikan bahwa hasil pengendapan dapat diandalkan untuk pemisahan ^{137}Cs dalam bahan bakar U_3Si_2/Al dan meningkatkan keakuratan metode dalam mengisolasi isotop ^{137}Cs dari bahan bakar nuklir pasca iradiasi.

Metode pengendapan kloroplatinat berhasil memisahkan isotop ^{137}Cs dengan baik, dengan hasil partikel Cs_2PtCl_6 yang memiliki morfologi dan komposisi sesuai harapan. Optimalisasi lebih lanjut dari kondisi reaksi mungkin dapat meningkatkan efisiensi pemulihan isotop ini, tetapi hasil yang diperoleh sudah memberikan dasar yang kuat untuk penggunaan metode ini dalam analisis burnup bahan bakar nuklir. Di samping itu, pustaka [16] menekankan bahwa metode presipitasi seperti ini mampu memberikan endapan dengan karakteristik fisik yang memadai, mendukung kestabilan selama penyimpanan dan analisis lebih lanjut.

Efektivitas metode pengendapan kemudian dievaluasi menggunakan spektrometri gamma terhadap sampel PEB U_3Si_2/Al pasca-iradiasi. Spektrum menunjukkan radionuklida ^{137}Cs pada energi 661,7 keV. Aktivitas awal ^{137}Cs dalam larutan memiliki luas puncak sebesar 69,1658 cps. Setelah proses pemisahan, luas puncak pada endapan cokelat hanya sebesar 0,9165 cps, sedangkan endapan Cs_2PtCl_6 menunjukkan luas puncak sebesar 67,6298 cps. Pada supernatan, luas puncak menurun menjadi 0,2450 cps. Hal tersebut juga dinyatakan Roger, dkk dalam penelitiannya bahwa pengendapan selektif ^{137}Cs dengan reagen kompleks dapat mengurangi kandungan isotop dalam supernatan [17].

Distribusi tersebut menunjukkan bahwa sebagian besar ^{137}Cs berhasil dipindahkan dari larutan ke dalam endapan Cs_2PtCl_6 (Gambar 4). Dalam penelitian sebelumnya, metode pengendapan kloroplatinat juga berhasil mengikat ^{137}Cs secara efisien, dengan spektrum menunjukkan peningkatan pada endapan senyawa Cs_2PtCl_6 [18]. Hal ini mencerminkan bahwa proses adsorpsi awal pada partikel endapan nonselektif, seperti yang diamati dalam pustaka [19], di mana partikel-partikel berwarna sering terbentuk akibat adanya pengotor sebelum isotop terikat lebih kuat dalam proses pengendapan berikutnya.

(a) Sebelum pengendapan (b) Endapan cokelat



Gambar 4 Spektrum gamma ^{137}Cs pada (a) larutan sebelum pengendapan, (b) endapan cokelat, (c) endapan Cs_2PtCl_6, dan (d) larutan supernatan.

Kuantifikasi ^{137}Cs pada sepuluh pengukuran duplo dari posisi *bottom*, *middle*, dan *top* menunjukkan bahwa *recovery* pemisahan berada pada rentang 94,91–98,30%. Nilai tertinggi sebesar 98,30% diperoleh pada sampel B2.2, sedangkan nilai terendah sebesar 94,91% diperoleh pada sampel M1.2. Nilai *recovery* rata-rata seluruh sampel mencapai 96,39%, yang menunjukkan konsistensi pemisahan ^{137}Cs pada berbagai posisi PEB (Tabel 2). Kandungan ^{137}Cs pada supernatan relatif rendah, yaitu 0,2894–2,7377 µg/g PEB, sedangkan kandungan ^{137}Cs pada endapan cokelat berada pada kisaran 2,1401–17,9954 µg/g PEB. Data tersebut memperkuat bahwa sebagian besar ^{137}Cs berada pada fraksi Cs_2PtCl_6.

Tabel 2
Kandungan ^{137}Cs dan recovery pemisahan pada berbagai bagian PEB U_3Si_2/Al

Kode sampel	Posisi	^{137}Cs awal (µg/g PEB)	^{137}Cs dalam endapan Cs_2PtCl_6 (µg/g PEB)	*Recovery* (%)
B1.1	*Bottom*	951,9426	930,4576	97,74
B1.2	*Bottom*	945,9061	908,1232	96,01
B2.1	*Bottom*	1125,5734	1079,7870	95,93
B2.2	*Bottom*	1135,4665	1116,1727	98,30
M1.1	*Middle*	1207,0553	1152,5016	95,48
M1.2	*Middle*	1196,1941	1135,3069	94,91
T1.1	*Top*	1027,5409	987,4004	96,09
T1.2	*Top*	1014,5517	969,7172	95,58
T2.1	*Top*	868,9633	844,9625	97,24
T2.2	*Top*	833,4867	805,5794	96,65

Nilai *recovery* rata-rata 96,39% menunjukkan peningkatan dibandingkan metode sebelumnya yang menghasilkan *recovery* sekitar 70%. Peningkatan ini menunjukkan bahwa optimasi temperatur dan waktu pengendapan mampu meningkatkan efisiensi pemisahan ^{137}Cs melalui pembentukan Cs_2PtCl_6. Kombinasi hasil *recovery* yang tinggi, identifikasi Cs_2PtCl_6 sebagai fase utama, serta distribusi Cs, Pt, dan Cl yang relatif

homogen menunjukkan endapan hasil proses ini memiliki karakteristik yang mendukung pengembangannya sebagai kandidat bahan sumber standar ^{137}Cs.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil karakterisasi struktur kristal, distribusi unsur, dan efisiensi pemisahan yang diperoleh, endapan Cs_2PtCl_6 memiliki prospek yang sangat baik sebagai kandidat bahan baku sumber standar radionuklida ^{137}Cs. Nilai *recovery* rata-rata sebesar 96,39%, kemurnian fasa yang tinggi, serta distribusi unsur yang homogen menunjukkan bahwa material hasil penelitian ini layak untuk dikembangkan pada tahap berikutnya melalui standardisasi aktivitas, uji homogenitas, uji kestabilan jangka panjang, dan sertifikasi sebagai *certified reference material* (CRM) atau sumber standar sekunder. Pengembangan ini diharapkan mampu mendukung kemandirian Indonesia dalam penyediaan sumber standar radionuklida, mengurangi ketergantungan impor, serta meningkatkan nilai tambah limbah radioaktif hasil analisis *burn-up*.

KONTRIBUTOR PENULIS

Sebagai kontributor utama dalam naskah ini antara lain : Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Hermawan Candra, Juan Carlos Sihotang, Ahmad Ade Rofiqi.

DAFTAR PUSTAKA

Adha, F. (2022). *Pengaruh penambahan HCl dan alum sebagai pH adjuster terhadap proses koagulasi dan parameter biologis pada pengolahan air limbah industri kertas* [Tugas akhir diploma IV, Institut Teknologi Sains Bandung]. https://repository.itsb.ac.id/id/eprint/365/

Degueldre, C., Bertsch, J., & Martin, M. (2016). Post irradiation examination of nuclear fuel: Toward a complete analysis. *Progress in Nuclear Energy, 92*, 242–253. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2016.03.025

Deschamps, A., & Hutchinson, C. R. (2021). Precipitation kinetics in metallic alloys: Experiments and modeling. *Acta Materialia, 220*, Article 117338. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2021.117338

Gardner, L. J., Walling, S. A., Corkhill, C. L., & Hyatt, N. C. (2021). Thermal treatment of Cs-exchanged chabazite by hot isostatic pressing to support decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant. *Journal of Hazardous Materials, 413*, Article 125250. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125250

Ginting, A. B., & Liem, P. H. (2015). Absolute burnup measurement of LEU silicide fuel plate irradiated in the RSG GAS multipurpose reactor by destructive radiochemical technique. *Annals of Nuclear Energy, 85*, 613–620. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.06.016

Ginting, A. B., Yanlinastuti, Boybul, Supardjo, & Sungkono. (2022). Radionuklida cesium sebagai indikator penentuan burnup bahan bakar U_3Si_2/Al secara merusak. *Urania: Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir, 28*(3), 153–162. https://doi.org/10.17146/urania.2022.28.3.6711

Grupen, C. (2010). *Introduction to radiation protection: Practical knowledge for handling radioactive sources*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-02586-0

Ke, L., Luo, S., Ren, X., & Yuan, Y. (2021). Factors influencing the nucleation and crystal growth of solution-processed organic lead halide perovskites: A review. *Journal of Physics D: Applied Physics, 54*(16), Article 163001. https://doi.org/10.1088/1361-6463/abd728

Kim, J. S., Jeon, Y. S., Park, S. D., Ha, Y.-K., & Song, K. (2015). Analysis of high burnup pressurized water reactor fuel using uranium, plutonium, neodymium, and cesium isotope correlations with burnup. *Nuclear Engineering and Technology, 47*(7), 924–933. https://doi.org/10.1016/j.net.2015.08.002

Kołodyńska, D., Hubicki, Z., Majdan, M., Wawrzkiewicz, M., Gładysz-Płaska, A., Wołowicz, A., … Lipke, A. (2018). *Optimization of methods for removing various types of pollutions from model solutions and wastewaters* [Laporan penelitian]. Department of Inorganic Chemistry. https://phavi.umcs.pl/at/attachments/2019/0506/172801-bs-reports-2018.pdf

Nugroho, A., Boybul, Indaryati, S., Haryati, I., Kriswarini, R., & Ginting, A. B. (2019). Pemisahan cesium dalam PEB U_3Si_2/Al densitas 2,96 gU/cm³ pasca iradiasi dengan metode pengendapan chloroplatinate. *Urania: Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir, 25*(2), 103–114. https://doi.org/10.17146/urania.2019.25.2.5466

Nugroho, A., Boybul, Indaryati, S., Haryati, I., Kriswarini, R., & Noerpitasari, E. (2020). Pemisahan cesium dalam PEB U_3Si_2/Al densitas 4,8 gU/cm³ pasca iradiasi menggunakan metode pengendapan chloroplatinate dan kolom penukar kation resin Dowex. *Urania: Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir, 26*(3), 189–202. https://doi.org/10.17146/urania.2020.26.3.6055

Okashita, H., & Natsume, H. (1972). A comparison of radiochemical methods for cesium-137 determination. *Journal of Nuclear Science and Technology, 9*(4), 241–248. https://doi.org/10.1080/18811248.1972.9734836

Pianowska, K., Kluczka, J., Benke, G., Goc, K., Malarz, J., Ochmański, M., & Leszczyńska-Sejda, K. (2023). Solvent extraction as a method of recovery and separation of platinum group metals. *Materials, 16*(13), Article 4681. https://doi.org/10.3390/ma16134681

Pozebon, D., Scheffler, G. L., & Dressler, V. L. (2017). Recent applications of laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry (LA-ICP-MS) for biological sample analysis: A follow-up review. *Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 32*(5), 890–919. https://doi.org/10.1039/C7JA00026J

Rogers, H., Bowers, J., & Gates-Anderson, D. (2012). An isotope dilution–precipitation process for removing radioactive cesium from wastewater. *Journal of Hazardous Materials, 243*, 124–129. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.10.006

University of Alabama at Birmingham. (2007). *Accepted half-lives of commonly used radioisotopes*. https://www.uab.edu/ehs/images/docs/rad/Accepted_HalfLives_Commonly_Used_Radioisotopes.pdf

Wang, Y., Liu, Y., Wiley, D., Zhao, S., & Tang, Z. (2021). Recent advances in electrocatalytic chloride oxidation for chlorine gas production. *Journal of Materials Chemistry A, 9*(35), 18974–18993. https://doi.org/10.1039/D1TA02745J

Wu, R., Liu, Y., Hu, S., Fu, P., & Xiao, Z. (2022). Red-emitting perovskite variant Cs_2PtCl_6 phosphor: Material design, luminous mechanism, and application in high-color-rendering white light-emitting diodes. *Advanced Optical Materials, 10*(21), Article 2201081. https://doi.org/10.1002/adom.202201081