

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <https://ejournal.brin.go.id/urania>



ANALISIS RADIONUKLIDA ^{137}Cs DI DALAM PELAT ELEMEN BAKAR NUKLIR $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ DENSITAS $4,8 \text{ gU/cm}^3$ *BURNUP* 60% PASCA IRADIASI MENGGUNAKAN METODE KLOOROPLATINAT

Arif Nugroho^{1,2}, Komar Sutriah², Sri Mulijani², Triyono Basuki¹, Ahmad Ade Rofiqi², Boybul¹, Erlina Noerpitasari¹, Rosika Kriswarini¹, Juan Carlos Sihotang¹, Agus Jamaludin¹

¹Pusat Riset Teknologi Bahan Nuklir Dan Limbah Radioaktif – BRIN

Kawasan Sains dan Teknologi B.J Habibie Gd. 720, Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15314

²Departemen Kimia, Fakultas MIPA, IPB University

Jl. Tanjung Kampus IPB, Dramaga, Bogor

e-mail: arif011@brin.go.id

(Naskah diterima: 28–09–2024, Naskah direvisi: 30–10–2024, Naskah disetujui: 04–11–2024)

ABSTRAK

ANALISIS RADIONUKLIDA ^{137}Cs DI DALAM PELAT ELEMEN BAKAR NUKLIR $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ DENSITAS $4,8 \text{ gU/cm}^3$ *BURNUP* 60% PASCA IRADIASI MENGGUNAKAN METODE KLOOROPLATINAT. Analisis isotop ^{137}Cs dalam bahan bakar nuklir pasca-iradiasi memainkan peran penting dalam menentukan *burn up* dan perilaku bahan bakar selama mengalami proses fisi di reaktor. Isotop ^{137}Cs digunakan sebagai asupan data untuk perhitungan *burn up* karena salah satunya memiliki waktu paruh yang panjang (30,17 tahun) dan *fission yield* yang besar (6,026%). Penelitian ini bertujuan untuk memisahkan isotop ^{137}Cs dari bahan bakar nuklir $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ dengan *burn up* 60% pasca iradiasi, menggunakan metode pengendapan kloroplatinat. Proses pemisahan dimulai dengan pemotongan dan pelarutan sampel bahan bakar, diikuti dengan penambahan CsNO_3 sebagai larutan pembawa (*carrier*) dan reagen H_2PtCl_6 untuk membentuk endapan Cs_2PtCl_6 . Hasil analisis menggunakan spektrometri gamma menunjukkan bahwa spektrum endapan Cs_2PtCl_6 memiliki luas puncak tertinggi sebesar 67,6298 cps dibandingkan dengan endapan coklat sebesar 0,9165 cps dan supernatan sebesar 0,2450 cps. Selain itu, hasil penelitian ini menunjukkan terjadi peningkatan nilai *recovery* pemisahan dari 70% menjadi 96,39%, yang menandakan keberhasilan pemisahan isotop ^{137}Cs dari larutan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ menggunakan metode pengendapan kloroplatinat. Hasil pemetaan unsur pada endapan Cs_2PtCl_6 menggunakan SEM (*scanning electron microscope*) menunjukkan distribusi merata dari komponen platinum (Pt), sesium (Cs), dan klorin (Cl), yang menunjukkan efisiensi metode pengendapan ini. Selain itu, analisis EDS (*energy dispersive X-ray spectroscopy*) menunjukkan komposisi unsur-unsur dalam endapan Cs_2PtCl_6 . Tiga unsur utama yang teridentifikasi adalah Pt, Cl, dan Cs. Hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi penting dalam mengevaluasi unjuk kerja bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi dan dapat digunakan untuk penelitian lebih lanjut tentang isotop Cs.

Kata kunci: Kloroplatinat, spektrometri gamma, SEM, $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$, isotop ^{137}Cs

Analisis Radionuklida ^{137}Cs di Dalam Pelat Elemen Bakar Nuklir $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ Burnup 60% Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Kloroplatinat (Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Boybul, Erlina Noerpitasari, Rosika Kriswarini, Juan Carlos Sihotang, Agus Jamaludin)

ABSTRACT

ANALYSIS OF RADIONUCLIDE ^{137}Cs IN THE PLATE OF THE NUCLEAR FUEL ELEMENT $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ DENSITY 4.8 gU/cm^3 BURN UP 60% POST IRRADIATION USING THE CHLOROPLATINE METHOD. Analysis of ^{137}C isotopes in post-irradiation nuclear fuel is vital in determining burn up and fuel behavior during fission. The ^{137}Cs isotope is used as input data for burn up calculations because it has a long half-life (30.17 years) and a large fission yield (6.026%). This study uses the chloroplatinate precipitation method to separate the ^{137}Cs isotope from $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ nuclear fuel with a density of 4.8 gU/cm^3 with a burn up of 60% after irradiation. The separation process begins with cutting and dissolving the fuel sample, followed by the addition of CsNO_3 as a carrier solution and H_2PtCl_6 reagent to form Cs_2PtCl_6 precipitate. The results of the analysis using gamma spectrometry showed that the spectrum of the Cs_2PtCl_6 precipitate had the highest peak area of 67.6298 cps compared to the brown residue of 0.9165 cps and the supernatant of 0.2450 cps. In addition, the results of this study showed an increase in the separation recovery value from 70% to 96.39%, which indicates the success of the separation of the ^{137}Cs isotope from the $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ fuel solution with a density of 4.8 gU/cm^3 using the chloropaltinate precipitation method. The results of elemental mapping of the Cs_2PtCl_6 precipitate using SEM (scanning electron microscope) showed an even distribution of platinum (Pt), cesium (Cs), and chlorine (Cl) components, which shows the efficiency of this precipitation method. In addition, EDS (energy dispersive X-ray spectroscopy) analysis shows the elemental composition of the Cs_2PtCl_6 deposits. The three main elements identified are Pt, Cl, and Cs. The results of this study can provide an essential contribution to evaluating the performance of $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ fuel with a density of 4.8 gU/cm^3 after irradiation. They can be used for further research on Cs isotopes.

Keywords: chloroplatinate, gamma spectrometry, SEM, $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$, ^{137}Cs isotope

Analisis Radionuklida ^{137}Cs di Dalam Pelat Elemen Bakar Nuklir $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$
Densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ *Burnup* 60% Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Kloroplatinat
(Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Boybul,
Erlina Noerpitasari, Rosika Kriswarini, Juan Carlos Sihotang, Agus Jamaludin)

PENDAHULUAN

Nuklir memiliki peran penting dalam berbagai disiplin ilmu, terutama dalam analisis isotop dan proses fisi yang terjadi selama iradiasi material di reaktor [1]. Salah satu fokus utama dalam penelitian nuklir adalah perilaku bahan bakar selama proses iradiasi, yang memungkinkan pemahaman lebih lanjut mengenai interaksi material dengan neutron, perubahan struktural, dan sifat fisikokimia yang dihasilkan. Analisis yang tepat terhadap bahan bakar ini sangat penting untuk mengetahui perubahan karakteristik yang terjadi setelah iradiasi.

Bahan bakar nuklir berbasis uranium adalah komponen penting dalam operasi reaktor nuklir, berperan dalam proses fisi yang menghasilkan energi. Uranium, sebagai elemen fisil, memiliki beberapa bentuk kimia dan material yang digunakan sebagai bahan bakar, salah satunya adalah uranium silisida (U_3Si_2) yang dipadukan dengan aluminium (Al) untuk membentuk bahan bakar dispersi $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ [2],[3]. Bahan bakar ini sering digunakan dalam reaktor riset karena kombinasi unik antara stabilitas termalnya yang tinggi dan efisiensinya dalam menghasilkan energi melalui reaksi fisi. U_3Si_2 berfungsi sebagai bahan fisil utama, sementara Al menjaga integritas struktural bahan bakar [4].

Pemilihan bahan ini didasarkan pada sifat fisik dan kimia yang unggul, serta kemampuannya untuk mempertahankan bentuknya dalam kondisi operasi reaktor, faktor kritis dalam menjamin keselamatan dan efisiensi operasional reaktor. Karakteristik bahan bakar nuklir berbasis uranium ini sangat menentukan dalam kinerja reaktor, karena bahan ini harus mampu menahan perubahan struktur dan komposisi akibat paparan iradiasi neutron [5]. Iradiasi neutron selama operasi reaktor nuklir menghasilkan perubahan signifikan pada mikrostruktur dan komposisi kimia bahan bakar nuklir. Ketika bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ terpapar neutron, kerusakan pada struktur kristal dapat terjadi, di mana atom-atom terdorong keluar dari posisi asalnya, menciptakan dislokasi dan kekosongan dalam jaringan kristal. Perubahan ini dapat menyebabkan penurunan kekuatan mekanik dan peningkatan kerentanan terhadap kegagalan struktural, misalnya *swelling* [6].

Iradiasi neutron juga menyebabkan transmudasi nuklir, di mana isotop dalam bahan bakar berubah menjadi isotop lain, menghasilkan perubahan dalam komposisi kimia. Salah satu contohnya adalah pembentukan gas-gas fisi yang terperangkap dalam bahan bakar, yang dapat menyebabkan *swelling* serta peningkatan tekanan internal [7]. Jika tidak dikelola dengan baik, gas-gas ini dapat membentuk gelembung yang mempengaruhi densitas dan keutuhan bahan bakar, serta mengurangi efisiensi transfer panas dari bahan bakar ke pendingin reaktor. Akibat radiasi akan terjadi perubahan mikrostruktur yang disertai dengan perubahan fase dalam bahan bakar, yang dapat menyebabkan segregasi elemen dan pembentukan senyawa baru yang tidak diinginkan [8]. Kombinasi dari semua perubahan ini menuntut analisis mendalam dan pemantauan ketat untuk memastikan bahwa bahan bakar tetap aman dan efisien selama digunakan di dalam reaktor.

Selain perubahan mikrostruktur, derajat bakar atau *burnup* juga merupakan parameter penting dalam evaluasi kinerja bahan bakar nuklir, yang mengukur sejauh mana bahan fisil telah digunakan selama reaksi fisi. *Burnup* berfungsi sebagai indikator efisiensi bahan bakar, semakin tinggi *burnup*, semakin banyak hasil fisi yang dihasilkan, tetapi juga berarti bahwa bahan bakar telah mengalami perubahan signifikan dalam struktur dan komposisi kimianya [9]. Isotop ^{137}Cs , sebagai salah satu hasil fisi, sering dianalisis untuk mengukur tingkat pembakaran bahan bakar nuklir [10]. Isotop ini berperan penting dalam penentuan *burn up* karena mempunyai waktu paruh yang panjang 30,17 tahun dan *fission yield* yang besar 6,026%, menjadikannya indikator penting dalam mengukur efisiensi reaksi fisi yang terjadi.

Dengan waktu paruh sekitar 30,17 tahun, ^{137}Cs memungkinkan untuk tetap terdeteksi dan diukur dengan baik jauh setelah bahan bakar diiradiasi [11],[12]. Stabilitas ini memberikan keuntungan signifikan dalam analisis pasca iradiasi, karena ^{137}Cs dapat memberikan data yang akurat untuk penentuan *burnup*. Dalam proses penentuan *burnup*, konsentrasi ^{137}Cs yang dihasilkan selama operasi reaktor digunakan untuk menghitung jumlah bahan fisil yang telah dihasilkan [13]. Pengukuran isotop ini dilakukan menggunakan

Analisis Radionuklida ^{137}Cs di Dalam Pelat Elemen Bakar Nuklir $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ *Burnup* 60% Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Kloroplatinat (Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Boybul, Erlina Noerpitasari, Rosika Kriswarini, Juan Carlos Sihotang, Agus Jamaludin)

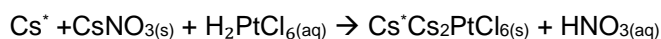
spektrometri gamma, yang memungkinkan pendeteksian dengan presisi tinggi berkat emisi radiasi gamma karakteristiknya [14].

Selain itu, isotop ^{137}Cs juga berperan dalam penilaian kinerja bahan bakar secara keseluruhan. Keberadaan isotop ini dalam jumlah tertentu dapat digunakan untuk menilai akumulasi hasil fisi di dalam bahan bakar, yang dapat mempengaruhi sifat fisik dan kimia bahan tersebut [15],[16]. Oleh karena itu, untuk mendapatkan nilai *burnup* yang akurat harus diketahui jumlah isotop ^{137}Cs dalam bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi dengan metode pemisahan. Berbagai metode telah digunakan, untuk pemisahan ^{137}Cs dalam larutan bahan bakar nuklir khususnya metode pengendapan menggunakan reagen seperti zeolit, perklorat, resin dowex, dan kloroplatinat. Metode pengendapan menggunakan reagen kloroplatinat berpotensi menghasilkan

kemurnian yang tinggi, selektif, serta hasil yang stabil.

Proses ini dimulai dengan pelarutan bahan bakar nuklir yang telah diiradiasi dalam campuran asam kuat, seperti asam klorida (HCl) dan asam nitrat (HNO_3), yang bertujuan untuk memecah struktur bahan bakar dan melepaskan isotop ^{137}Cs ke dalam larutan. Setelah isotop ^{137}Cs berada dalam bentuk terlarut, ditambahkan CsNO_3 sebagai pembawa non-aktif untuk meningkatkan limit deteksi dan memastikan bahwa semua ion Cs dalam larutan berpartisipasi dalam reaksi pengendapan [17].

Penelitian ini bertujuan untuk memisahkan isotop ^{137}Cs dari isotop lainnya yang terdapat dalam bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ *burnup* 60% pasca iradiasi menggunakan metode pengendapan kloroplatinat. Mekanisme pengendapan ^{137}Cs terjadi melalui reaksi kimia sebagai berikut.



Jumlah isotop ^{137}Cs yang terendapkan dalam bentuk Cs_2PtCl_6 diukur dengan Spektrometer gamma, sedangkan morfologi komposisi unsur dari endapan Cs_2PtCl_6 dianalisis menggunakan SEM (*scanning electron microscope*).

Dengan memahami hasil analisis isotop ini, diharapkan dapat memperkaya pengetahuan mengenai bahan bakar dan proses iradiasi selama di reaktor. Meskipun metode ini telah terbukti efektif, tingkat pemulihan isotop ^{137}Cs sering kali berkisar sekitar 70%, yang menunjukkan tantangan dalam mencapai efisiensi maksimal [18]. Optimalisasi faktor-faktor seperti temperatur reaksi dan waktu pengendapan menjadi fokus utama untuk meningkatkan akurasi dan presisi proses ini [19].

Temperatur reaksi berperan signifikan dalam proses pemisahan. Temperatur yang lebih tinggi dapat mempercepat reaksi kimia dan meningkatkan laju pengendapan, namun perlu dikendalikan untuk menghindari dekomposisi reagen atau pembentukan endapan yang tidak diinginkan [20]. Selain temperatur, waktu pengendapan merupakan faktor lain yang mempengaruhi hasil akhir. Waktu yang terlalu singkat mungkin tidak cukup untuk memastikan semua ^{137}Cs terendapkan dengan baik, sementara waktu yang terlalu lama dapat menyebabkan

masalah seperti pengendapan ulang atau kehilangan isotop dalam larutan [21]. Penentuan waktu yang tepat memerlukan keseimbangan antara efisiensi dan kualitas endapan yang diperoleh.

Secara keseluruhan, penelitian ini akan memberikan gambaran mengenai uji pasca iradiasi secara merusak dengan menganalisis perilaku isotop ^{137}Cs dan morfologi unsur penyusunnya setelah dilakukan proses pemisahan dengan metode kloroplatinat.

METODOLOGI

Alat yang digunakan pada penelitian ini yaitu beaker gelas kosong, timbangan analitik, corong buchner, spektrometer gamma Merk Gennie 2000 dengan detektor HpGe, SEM dari produk Phenom Pharos dari Thermo Scientific dan penangas es, sementara bahan yang digunakan meliputi sampel pelat elemen bakar (PEB) $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi kode SIBU60 EBU CBBJ 250, CsNO_3 *carrier*, air deionisasi, larutan Fe, NaOH, indikator *methyl red*, HCl, H_2PtCl_6 , dan etanol.

Penelitian diawali dengan pemotongan sampel PEB dengan posisi seperti pada Gambar 1. Pencuplikan dan pelarutan sampel PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ dilakukan pada bagian *top* secara duplo dengan berat PEB dengan kode T1=0,063 g, T2=0,050 g, bagian *middle*

Analisis Radionuklida ^{137}Cs di Dalam Pelat Elemen Bakar Nuklir $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$
 Densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ *Burnup* 60% Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Kloroplatinat
 (Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Boybul,
 Erlina Noerpitasari, Rosika Kriswarini, Juan Carlos Sihotang, Agus Jamaludin)

dengan kode M1=0,040 g serta bagian *bottom* dengan kode B1=0,036 g, B2=0,037 g masing masing sampel dilarutkan dengan 5 mL HCl 6M kemudian 5 mL HNO_3 6M. Setelah sampel larut maka diambil 1 mL untuk dikeluarkan di dalam *hotcell* 109. Selanjutnya larutan tersebut diencerkan menggunakan aquades menjadi 20 mL untuk dijadikan menjadi larutan induk (larutan PEB) [22].

Beaker gelas kosong ditimbang menggunakan timbangan analitik untuk mendapatkan berat awal. Sampel larutan PEB dengan kode SIBU60 EBU CBBJ 250 pada posisi *top*, *middle*, dan *bottom* masing-masing dipipet sebanyak 100 μL dimasukkan ke dalam beaker, kemudian ditambahkan CsNO_3 carrier seberat 100 mg dan 20 mL air deionisasi ke dalam beaker, dan campuran diaduk untuk memastikan seluruh sampel PEB terbilas dengan baik dari botol aslinya.

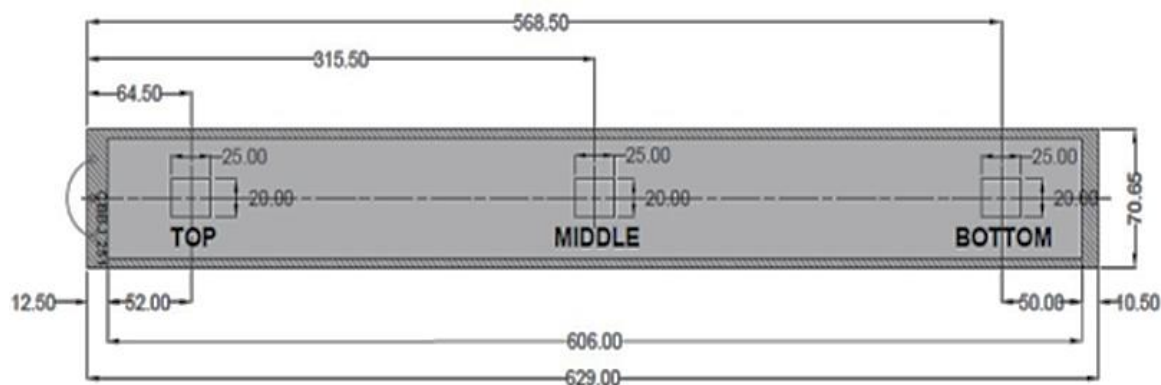
Ke dalam campuran kemudian, ditambahkan dua tetes larutan Fe sebagai katalis. Larutan NaOH kemudian ditambahkan secara bertahap hingga terbentuk endapan coklat yang menandakan berakhirnya reaksi pembentukan endapan. Campuran ini dipanaskan hingga mendidih dan mengental, kemudian didinginkan selama 5 menit. Setelah itu, endapan dipisahkan dari larutan menggunakan corong Buchner, di mana endapan tertampung di kertas saring dan larutan ditempatkan kembali ke dalam beaker.

Larutan yang tersisa dalam beaker ditambahkan tiga tetes indikator *methyl red* dan diaduk hingga homogen. Larutan HCl kembali ditambahkan secara bertahap hingga warna merah muncul, setelah itu dua tetes larutan Fe kembali ditambahkan, dan proses

penambahan NaOH diulang hingga tidak ada lagi pembentukan endapan coklat. Campuran kemudian dipanaskan hingga mendidih dan mengental, diikuti dengan pendinginan selama 5 menit. Endapan coklat yang terbentuk dipisahkan dari larutan menggunakan corong Buchner dan dikumpulkan dalam botol sampel. Endapan ini kemudian dikeringkan pada temperatur 25°C .

Larutan yang tersisa dalam beaker kemudian dititrasi dengan HCl secara bertahap hingga larutan berubah menjadi merah. Setelah itu, larutan ditempatkan dalam penangas es dan ditambahkan 2 mL larutan H_2PtCl_6 . Campuran ini didiamkan selama 10 menit untuk memungkinkan pembentukan endapan Cs_2PtCl_6 . Endapan Cs_2PtCl_6 kemudian dipisahkan dari larutan menggunakan corong Buchner dan dicuci secara bertahap dengan air deionisasi dan etanol. Cairan cucian sebagai supernatant ditampung secara terpisah, dan endapan Cs_2PtCl_6 dikeringkan pada temperatur 25°C .

Setelah proses pengeringan selesai, semua endapan coklat dan endapan Cs_2PtCl_6 ditimbang untuk mencatat bobot akhir. Masing-masing supernatant dari proses pencucian diambil sebanyak 2 mL dan dimasukkan ke dalam botol sampel. Semua sampel yang terdiri dari endapan coklat dan endapan Cs_2PtCl_6 dianalisis menggunakan spektrometer gamma untuk mengukur berat isotop ^{137}Cs dengan waktu cacah 500 detik. Sementara, morfologi dan kandungan unsur dari endapan Cs_2PtCl_6 yang diperoleh dianalisis menggunakan SEM [18].



Gambar 1. Posisi pemotongan sampel PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pada bagian: *top*, *middle*, dan *bottom*.

Analisis Radionuklida ^{137}Cs di Dalam Pelat Elemen Bakar Nuklir $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ *Burnup* 60% Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Kloroplatinat (Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Boybul, Erlina Noerpitasari, Rosika Kriswarini, Juan Carlos Sihotang, Agus Jamaludin)

HASIL DAN PEMBAHASAN

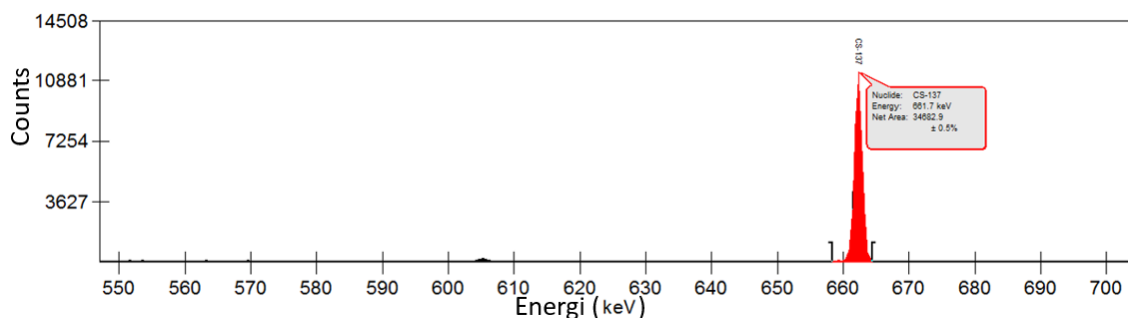
Analisis isotop ^{137}Cs menggunakan Spektrometer gamma

Hasil pengukuran isotop ^{137}Cs dengan spektrometer gamma menunjukkan perbedaan spektrum pada tiap langkah pemisahan menggunakan metode pengendapan kloroplatinat seperti ditunjukkan pada Gambar 2 hingga Gambar 5. Pada spektrum awal yang ditunjukkan pada Gambar 2, terlihat puncak pada energi 661,7 keV dengan luas 69,1658 cps yang menunjukkan keberadaan ^{137}Cs awal dalam larutan $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ sebelum dilakukan proses pengendapan. Setelah proses pengendapan, spektrum endapan coklat pada Gambar 3 menunjukkan puncak yang lebih rendah dengan luas area sebesar 0,9165 cps, menandakan isotop ^{137}Cs berkurang di dalam endapan. Hal ini mencerminkan bahwa proses adsorpsi awal pada partikel endapan non-selektif, seperti yang diamati dalam pustaka [23], di mana partikel-partikel berwarna sering terbentuk akibat adanya pengotor sebelum isotop terikat lebih kuat dalam proses pengendapan berikutnya.

Spektrum endapan Cs_2PtCl_6 pada Gambar 4 menampilkan puncak yang lebih signifikan dengan luas 67,6298 cps yang mengindikasikan bahwa ^{137}Cs telah berhasil terikat dalam bentuk endapan senyawa Cs_2PtCl_6 . Dalam penelitian sebelumnya, metode pengendapan kloroplatinat juga berhasil mengikat ^{137}Cs secara efisien, dengan spektrum menunjukkan peningkatan pada endapan senyawa Cs_2PtCl_6 [24]. Pada spektrum larutan supernatan di Gambar 5, puncak dengan luas 0,2450 cps terlihat sangat berkurang dibandingkan dengan spektrum sebelumnya. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar ^{137}Cs telah berhasil dipisahkan dari larutan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$. Hasil ini menegaskan bahwa metode

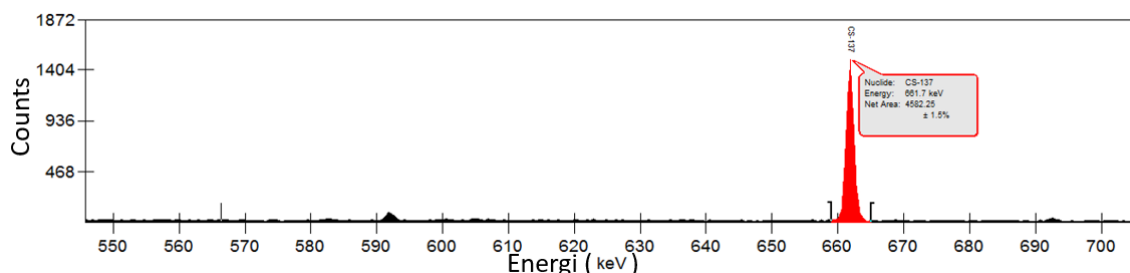
pengendapan kloroplatinat efektif dalam memisahkan isotop ^{137}Cs dari larutan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$. Penurunan ^{137}Cs signifikan dalam supernatan mengindikasikan bahwa mayoritas isotop ^{137}Cs telah berhasil dipisahkan. Hal tersebut juga dinyatakan Roger, dkk dalam penelitiannya bahwa pengendapan selektif ^{137}Cs dengan reagen kompleks dapat mengurangi kandungan isotop dalam supernatan [25].

Hasil pengukuran kandungan isotop ^{137}Cs di dalam endapan Cs_2PtCl_6 untuk berbagai potongan sampel ditunjukkan pada Tabel 1. Kandungan awal isotop ^{137}Cs dalam sampel berkisar antara 833,4867 $\mu\text{g/g}$ hingga 1207,0553 $\mu\text{g/g}$. Setelah pemisahan menggunakan endapan Cs_2PtCl_6 , kandungan ^{137}Cs menurun tetapi tetap signifikan, berkisar antara 805,5794 $\mu\text{g/g}$ hingga 1152,5016 $\mu\text{g/g}$. *Burnup* PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ paling besar diperoleh pada bagian *middle*. Hal ini disebabkan pada saat diiradiasi di RSG-GAS, posisi bahan bakar bagian *middle* dikelilingi oleh reflektor sebagai pengendali neutron, sehingga neutron secara terus menerus terrefleksi ke bagian *middle* bahan bakar yang menyebabkan reaksi fisi terjadi paling besar pada posisi bahan bakar bagian *middle* [22]. Nilai *recovery* pemisahan isotop ini sangat tinggi, yaitu antara 94,91% hingga 98,30%, yang menunjukkan efisiensi tinggi dari metode pemisahan ini. Efisiensi tertinggi teramati pada potongan bagian *bottom* (B2.2) dengan *recovery* sebesar 98,30%, sementara potongan bagian *middle* dan *top* menunjukkan *recovery* yang hampir mirip. Hal ini mengonfirmasi bahwa bagian *bottom* merupakan bagian yang paling efektif. Dengan diperolehnya nilai *recovery* rerata pemisahan di atas 96,39%, hal ini merupakan terobosan inovasi baru dalam peningkatan efisiensi pemisahan ^{137}Cs yang selama ini hanya sekitar 70% [18].

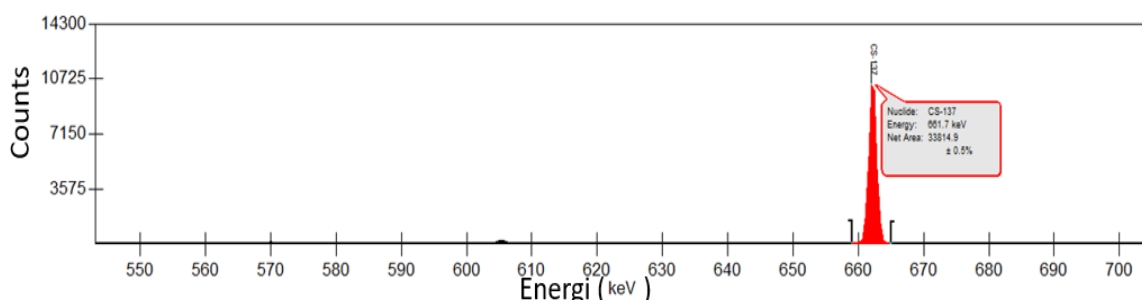


Gambar 2. Spektrum isotop ^{137}Cs sebelum proses pengendapan.

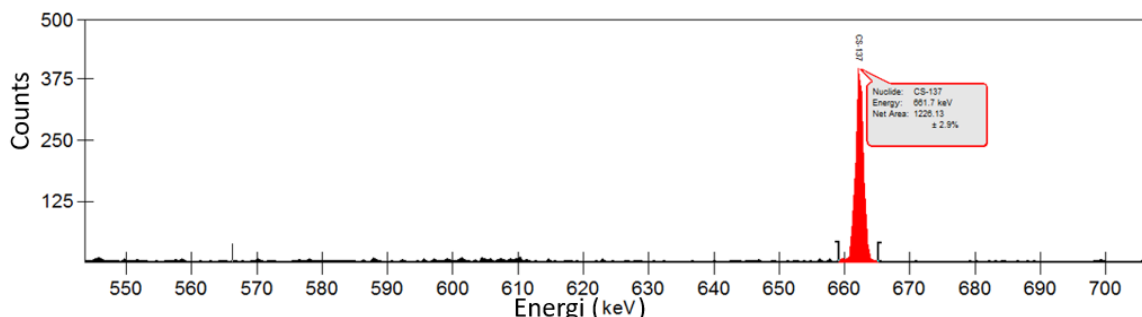
Analisis Radionuklida ^{137}Cs di Dalam Pelat Elemen Bakar Nuklir $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$
 Densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ *Burnup* 60% Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Kloroplatinat
 (Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Boybul,
 Erlina Noerpitasari, Rosika Kriswarini, Juan Carlos Sihotang, Agus Jamaludin)



Gambar 3. Spektrum isotop ^{137}Cs dalam endapan coklat setelah proses pengendapan.



Gambar 4. Spektrum isotop ^{137}Cs dalam endapan Cs_2PtCl_6 .



Gambar 5. Spektrum isotop ^{137}Cs dalam larutan supernatan.

Tabel 1. Kandungan isotop ^{137}Cs di dalam endapan Cs_2PtCl_6 dan rekoveri untuk potongan *bottom* (B), *middle* (M) dan *top* (T).

Kode Sampel	Berat PEB (g)	Berat sampel (100 μL) (g)	Kandungan ^{137}Cs mula-mula ($\mu\text{g/g}$ PEB)	Kandungan ^{137}Cs di endapan Cs_2PtCl_6 ($\mu\text{g/g}$ PEB)	Recovery pemisahan (%)	Rerata recovery pemisahan (%)
B1.1	0,0360	0,1017	951,9426	930,4576	97,74	96,87
B1.2	0,0360	0,1018	945,9061	908,1232	96,01	
B2.1	0,0370	0,1019	1125,5734	1079,7870	95,93	97,12
B2.2	0,0370	0,1011	1135,4665	1116,1727	98,30	
M1.1	0,0400	0,1027	1207,0553	1152,5016	95,48	95,20
M1.2	0,0400	0,1013	1196,1941	1135,3069	94,91	
T1.1	0,0630	0,1011	1027,5409	987,4004	96,09	95,84
T1.2	0,0630	0,1010	1014,5517	969,7172	95,58	
T2.1	0,0500	0,0969	868,9633	844,9625	97,24	96,94
T2.2	0,0500	0,1006	833,4867	805,5794	96,65	

Analisis Radionuklida ^{137}Cs di Dalam Pelat Elemen Bakar Nuklir $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ *Burnup* 60% Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Kloroplatinat (Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Boybul, Erlina Noerpitasari, Rosika Kriswarini, Juan Carlos Sihotang, Agus Jamaludin)

Hasil pengukuran kandungan ^{137}Cs di dalam supernatan, menunjukkan nilai yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan kandungan ^{137}Cs awal, maupun di dalam endapan Cs_2PtCl_6 yaitu berkisar antara $0,2894 \text{ }\mu\text{g/g}$ hingga $2,7377 \text{ }\mu\text{g/g}$ seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Hal ini menunjukkan bahwa

sebagian besar isotop ^{137}Cs telah berhasil dipisahkan dengan metode kloroplatinat dalam bentuk endapan Cs_2PtCl_6 . Hasil ini menunjukkan bahwa metode kloroplatinat sangat efektif digunakan untuk pemisahan ^{137}Cs dalam larutan bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca iradiasi.

Tabel 2. Kandungan isotop ^{137}Cs di dalam supernatan untuk potongan *bottom* (B), *middle* (M) dan *top* (T).

Kode Sampel	Berat PEB (g)	Berat sampel (100 μL) (g)	Kandungan ^{137}Cs di dalam supernatan ($\mu\text{g/g}$ PEB)	Rerata kandungan ^{137}Cs di dalam supernatan ($\mu\text{g/g}$ PEB)
B1.1	0,036	0,1017	0,6009	0,5308
B1.2	0,036	0,1018	0,4606	
B2.1	0,037	0,1019	1,2947	1,1022
B2.2	0,037	0,1011	0,6795	
M1.1	0,040	0,1027	2,7377	1,6217
M1.2	0,040	0,1013	0,5056	
T1.1	0,063	0,1011	0,4086	0,3490
T1.2	0,063	0,1010	0,2894	
T2.1	0,050	0,0969	0,5053	0,8870
T2.2	0,050	0,1006	1,2686	

Kandungan isotop ^{137}Cs di dalam endapan coklat setelah proses pemisahan berkisar antara $2,1401 \text{ }\mu\text{g/g}$ hingga $17,9954 \text{ }\mu\text{g/g}$, yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan kandungan dalam endapan Cs_2PtCl_6 , seperti ditunjukkan pada Tabel 3. Hal ini

mengonfirmasi bahwa isotop ^{137}Cs di dalam endapan coklat telah dipisahkan ke supernatan, selanjutnya supernatan yang mengandung ^{137}Cs ini direaksikan dengan asam kloroplatinat untuk mendapatkan endapan Cs_2PtCl_6 .

Tabel 3. Kandungan isotop ^{137}Cs di dalam endapan coklat untuk potongan *bottom* (B), *middle* (M) dan *top* (T).

Kode Sampel	Berat PEB (g)	Berat sampel (100 μL) (g)	Kandungan ^{137}Cs di endapan coklat ($\mu\text{g/g}$ PEB)	Rerata kandungan ^{137}Cs di endapan coklat ($\mu\text{g/g}$ PEB)
B1.1	0,036	0,1017	15,2528	14,9037
B1.2	0,036	0,1018	14,5545	
B2.1	0,037	0,1019	2,1401	7,4210
B2.2	0,037	0,1011	12,7019	
M1.1	0,040	0,1027	14,4719	16,2337
M1.2	0,040	0,1013	17,9954	
T1.1	0,063	0,1011	14,4786	13,1657
T1.2	0,063	0,1010	11,8527	
T2.1	0,050	0,0969	9,0608	5,5368
T2.2	0,050	0,1006	2,0128	

Analisis morfologi dan unsur menggunakan SEM

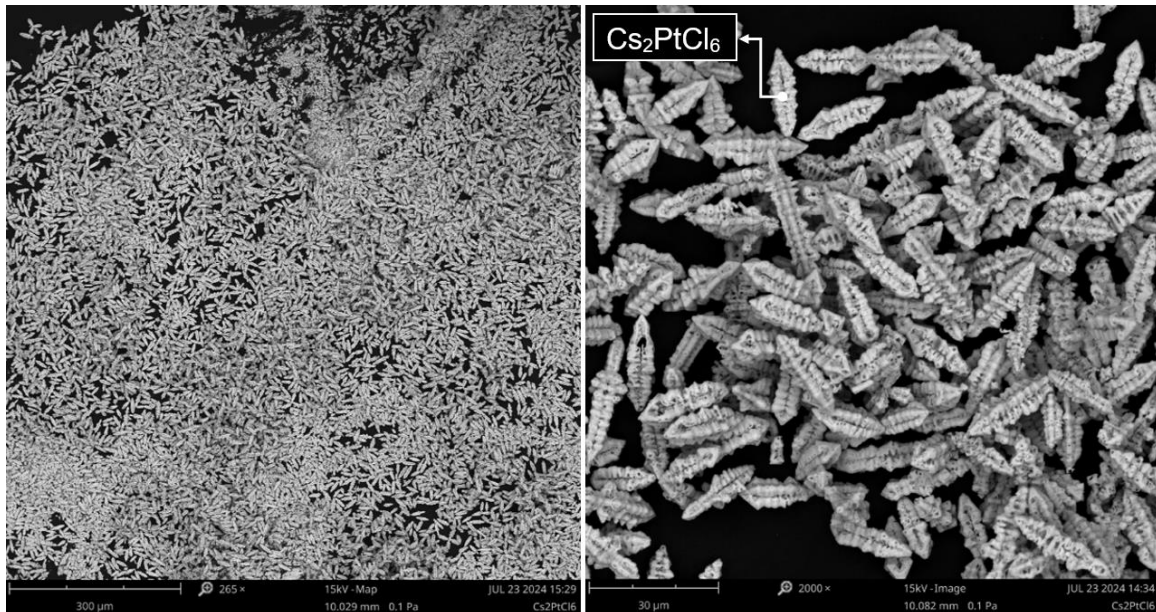
Hasil analisis morfologi dan unsur pada endapan Cs_2PtCl_6 menggunakan SEM menunjukkan partikel berbentuk prisma dengan ukuran bervariasi, yang tersebar

secara merata. Struktur mikro morfologi yang teramati mengindikasikan bahwa metode pengendapan kloroplatinat yang digunakan telah berhasil membentuk endapan Cs_2PtCl_6 dengan baik seperti yang terlihat pada Gambar 6. Morfologi partikel yang terlihat

Analisis Radionuklida ^{137}Cs di Dalam Pelat Elemen Bakar Nuklir $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$
 Densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ Burnup 60% Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Kloroplatinat
 (Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Boybul,
 Erlina Noerpitasari, Rosika Kriswarini, Juan Carlos Sihotang, Agus Jamaludin)

memberikan informasi terkait efektivitas proses pemisahan isotop ^{137}Cs dari bahan bakar nuklir pasca-iradiasi. 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 [26]. Partikel-partikel yang teramati menggunakan SEM juga mencerminkan kestabilan termal dari endapan, yang penting untuk memastikan integritas struktural selama analisis isotop [27].



Gambar 6. Morfologi Cs_2PtCl_6 hasil pengamatan menggunakan SEM

Pemetaan unsur (*elemental mapping*) dari endapan Cs_2PtCl_6 dengan SEM. Tiga unsur yaitu platinum (Pt), klorin (Cl), dan cesium (Cs) seperti yang terlihat pada Gambar 7. Unsur tersebut merupakan komponen utama dalam endapan yang dihasilkan. Pemetaan unsur menggunakan SEM menunjukkan bahwa platinum (Pt), klorin (Cl), dan cesium (Cs) terdistribusi merata di seluruh partikel endapan Cs_2PtCl_6 . Distribusi yang seragam ini mengindikasikan bahwa proses pengendapan berlangsung secara homogen, menghasilkan struktur kristal dendrit yang homogen. Pt sebagai komponen utama dalam senyawa Cs_2PtCl_6 , memiliki peran penting dalam pembentukan kristal dikarenakan Pt sebagai atom pusat melalui kompleks ion PtCl_6^{2-} , sementara Cl berperan dalam menjaga stabilitas struktur tersebut [28]. Keseragaman distribusi Cl, yang mengikuti pola distribusi Pt, menunjukkan bahwa kondisi pengendapan, seperti suhu dan waktu reaksi, telah dioptimalkan untuk mendukung pembentukan kristal yang efisien. Cesium, yang merupakan fokus utama

penelitian ini karena perannya dalam pemisahan isotop ^{137}Cs , juga terdistribusi merata dalam partikel Cs_2PtCl_6 . Hal ini menunjukkan bahwa metode pemisahan isotop ini efektif, memastikan konsistensi dalam pengendapan isotop ^{137}Cs . Penelitian yang dilakukan oleh [29] 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 $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ dan meningkatkan keakuratan metode dalam mengisolasi isotop ^{137}Cs dari bahan bakar nuklir pasca iradiasi.

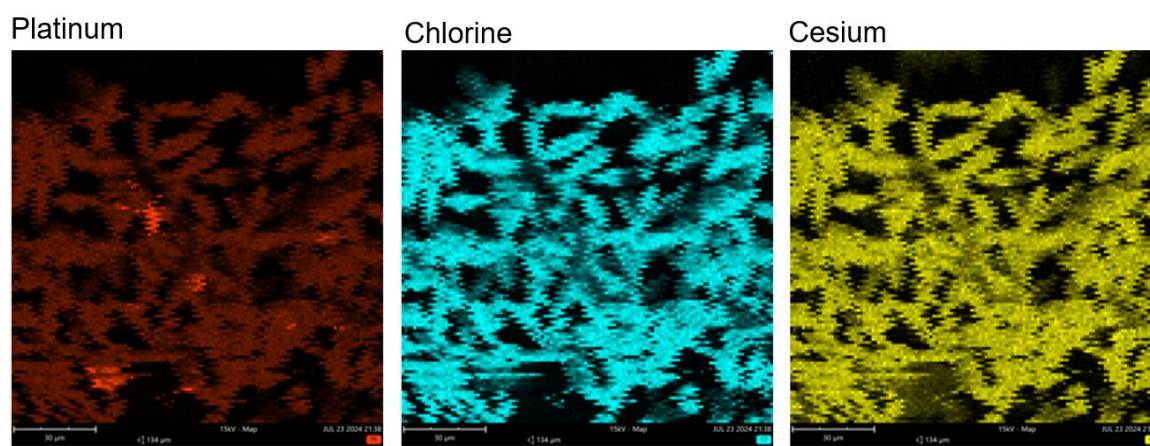
Analisis *energy dispersive X-ray spectroscopy* (EDS) yang disajikan menunjukkan komposisi unsur-unsur dalam endapan Cs_2PtCl_6 . Tiga unsur utama yang teridentifikasi adalah Pt, Cl, dan Cs, Spektrum EDS yang muncul pada Gambar 8 mengonfirmasi visual mengenai keberadaan ketiga unsur tersebut. Dominasi Pt dalam spektrum ini sesuai dengan rasio unsur yang

Analisis Radionuklida ^{137}Cs di Dalam Pelat Elemen Bakar Nuklir $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ *Burnup* 60% Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Kloroplatinat (Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Boybul, Erlina Noerpitasari, Rosika Kriswarini, Juan Carlos Sihotang, Agus Jamaludin)

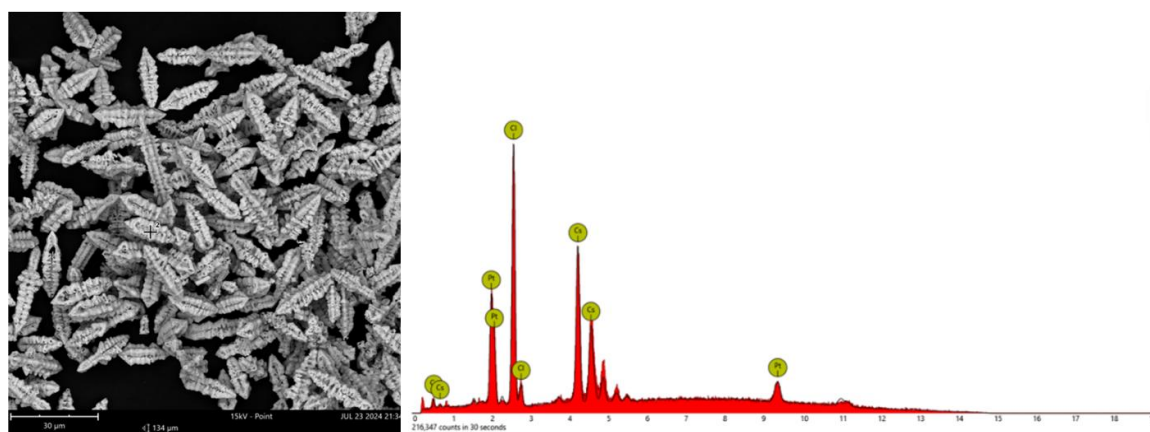
diharapkan dari senyawa Cs_2PtCl_6 . Tingginya kandungan Pt menunjukkan bahwa proses pengendapan yang dilakukan untuk memisahkan isotop ^{137}Cs efektif, dengan jumlah Cs yang cukup signifikan untuk analisis lebih lanjut.

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 [30] menekankan bahwa metode presipitasi seperti ini mampu memberikan endapan dengan karakteristik fisik yang memadai, mendukung kestabilan selama penyimpanan dan analisis lebih lanjut.



Gambar 7. Distribusi atom Pt, Cl, dan Cs



Gambar 8. Spektrum dari hasil EDS untuk atom Pt, Cl, dan Cs

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengembangkan metode pemisahan isotop ^{137}Cs dari bahan bakar nuklir $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ pasca-iradiasi menggunakan metode pengendapan kloroplatinat dari nilai *recovery* pemisahan sebesar 70% menjadi 96,39%. Hasilnya menunjukkan bahwa kandungan ^{137}Cs dalam endapan Cs_2PtCl_6 lebih tinggi dibandingkan dengan endapan coklat dan supernatan. Bagian *bottom* bahan bakar menghasilkan

persentase *recovery* tertinggi, yang menunjukkan bahwa keberadaan isotop ^{137}Cs paling dominan. Distribusi endapan yang merata untuk Pt, Cl, dan Cs menandakan bahwa reagen kloroplatinat berhasil mengikat Cs secara homogen. Selain itu, perbandingan konsentrasi atom dan berat yang diperoleh sejalan dengan rumus kimia cesium kloroplatinat (Cs_2PtCl_6), sehingga dapat dikonfirmasi bahwa struktur kristal yang terbentuk adalah senyawa tersebut.

Analisis Radionuklida ^{137}Cs di Dalam Pelat Elemen Bakar Nuklir $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$
 Densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ Burnup 60% Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Kloroplatinat
 (Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Boybul,
 Erlina Noerpitasari, Rosika Kriswarini, Juan Carlos Sihotang, Agus Jamaludin)

UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan ini selaku penulis mengucapkan terima kasih kepada Kepala Pusat Riset Teknologi Bahan Nuklir Dan Limbah Radioaktif dan Direktur Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran, Badan Riset dan Inovasi Nasional yang telah memfasilitasi penelitian ini.

KONTRIBUTOR PENULIS

Sebagai kontributor utama dalam naskah ini antara lain : Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Boybul, Erlina Noerpitasari, Rosika Kriswarini, Juan Carlos Sihotang, Agus Jamaludin.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kober, T., Schiffer, H. W., Densing, M., dan Panos, E., "Global energy perspectives to 2060–WEC's World Energy Scenarios 2019," *Energy Strategy Reviews*, vol. 31, no. 100523, 2020. doi: 10.1016/j.esr.2020.100523.
- [2] R. E. Agosta, "Enhanced method for the support of experiment safety analysis," disertasi, Univ. of Illinois, Urbana-Champaign, US, 2023.
- [3] Supardjo, T.Surbakti, E. P. Hastuti, A.Hamzah and A.B Ginting, "Teknik Pembuatan dan Pengujian Bahan Bakar Dispersi $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Densitas Uranium Tinggi," Buku Batan Press, 2019, pp. 3 -38D.
- [4] D. Keiser Jr., D. M. Wachs, A. B. Robinson, W. J. Williams, M. Lillo, N. E. Woolstenhulme, dan G. L. Hofman, "The use of $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ dispersion fuel for high power research reactors," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 528, no. 151820, 2020.
- [5] P. C. Burns, R. C. Ewing, dan A. Navrotsky, "Nuclear fuel in a reactor accident," *Science*, vol. 335, no. 6073, pp. 1184-1188, 2012.
- [6] G. Choudhuri et al., "Effect of ion and neutron irradiation on oxide of PHWR fuel tube material," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 514, pp. 12-27, 2019.
- [7] S. V. Bedenko, N. Ghal-Eh, I. O. Lutsik, dan I. V. Shamanin, "A fuel for generation IV nuclear energy system: Isotopic composition and radiation characteristic," *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 147, pp. 189-196, 2019.
- [8] A. S. Sharma, S. Yadav, K. Biswas, dan B. Basu, "High-entropy alloys and metallic nanocomposites: Processing challenges, microstructure development and property enhancement," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 131, pp. 1-42, 2018.
- [9] E. H. Uguru et al., "Burn-up calculation of the neutronic and safety parameters of thorium-uranium mixed oxide fuel cycle in a Westinghouse small modular reactor," *International Journal of Energy Research*, 2020. doi: 10.1002/er.6000.
- [10] W. Bu et al., "Mass spectrometry for the determination of fission products ^{135}Cs , ^{137}Cs and ^{90}Sr : A review of methodology and applications," *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, vol. 119, pp. 65-75, 2016.
- [11] I. V. Dyck et al., "Differentiation between chemo-and radiotoxicity of ^{137}Cs and ^{60}Co on *Lemna minor*," *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 272, no. 107351, 2024. doi: 10.1016/j.jenvrad.2023.107351.
- [12] R. Bhat dan V. M. Gómez-López, "Radionuclides in Food: Past, Present and Future," *Practical Food Safety: Contemporary Issues and Future Directions*, pp. 281-309, 2014.
- [13] E. H. Evans, J. Pisonero, C. M. Smith, dan R. N. Taylor, "Atomic spectrometry update: review of advances in atomic spectrometry and related techniques," *Journal of Analytical Atomic Spectrometry*, vol. 30, no. 5, pp. 1017-1037, 2015.
- [14] G. Jia dan J. Jia, "Determination of radium isotopes in environmental samples by gamma spectrometry, liquid scintillation counting and alpha spectrometry: a review of analytical methodology," *Journal of Environmental Radioactivity*, vol. 106, pp. 98-119, 2012.
- [15] M. A. Ashraf et al., "Cesium-137: radiochemistry, fate, and transport, remediation, and future concerns," *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, vol. 44, no. 15, pp. 1740-1793, 2014.
- [16] H. M. O. Parker dan M. J. Joyce, "The use of ionising radiation to image

Analisis Radionuklida ^{137}Cs di Dalam Pelat Elemen Bakar Nuklir $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ Densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ Burnup 60% Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Kloroplatinat (Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Boybul, Erlina Noerpitasari, Rosika Kriswarini, Juan Carlos Sihotang, Agus Jamaludin)

- nuclear fuel: A review," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 85, pp. 297-318, 2015. doi: 10.1016/j.pnucene.2015.06.006.
- [17] L. J. Gardner et al., "Thermal treatment of Cs-exchanged chabazite by hot isostatic pressing to support decommissioning of Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 413, no. 125250, 2021.
- [18] A. Nugroho et al., "Pemisahan cesium dalam PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $2,96 \text{ gU/cm}^3$ Pascairadiasi dengan metode pengendapan Chloroplatinate," *Jurnal Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 25, no. 2, pp. 71-140, 2019.
- [19] L. Iglesias et al., "Dissolution of high burn-up spent nuclear fuel at high-pH," *Radiochimica Acta*, vol. 111, no. 11, pp. 817-828, 2023. doi: 10.1515/ract-2023-0178.
- [20] P. Marchetti et al., "Molecular separation with organic solvent nanofiltration: a critical review," *Chemical Reviews*, vol. 114, no. 21, pp. 10735-10806, 2014.
- [21] X. Hou et al., "Present status and perspective of radiochemical analysis of radionuclides in Nordic countries," *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, vol. 309, pp. 1283-1319, 2016.
- [22] A. B. Ginting et al., "Radionuklida cesium sebagai indikator penentuan burnup bahan bakar $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ secara merusak," *Urania: Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir*, vol. 28, no. 3, pp. 153-162, 2022.
- [23] D. Kołodyńska et al., "Optimization of methods for removing various types of pollutions from model solutions and wastewaters," *Europe*, vol. 26, pp. 108, 2018.
- [24] A. Nugroho et al., "Pemisahan cesium dalam PEB $\text{U}_3\text{Si}_2/\text{Al}$ densitas $4,8 \text{ gU/cm}^3$ pasca iradiasi menggunakan metode pengendapan chloroplatinate dan kolom penukar kation resin dowex," *Jurnal Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 26, no. 2, pp. 131-214, 2020.
- [25] H. Rogers, J. Bowers, dan D. Gates-Anderson, "An isotope dilution-precipitation process for removing radioactive cesium from wastewater," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 243, pp. 124-129, 2012. doi: 10.1016/j.jhazmat.2012.10.006.
- [26] L. Ke, S. Luo, X. Ren, dan Y. Yuan, "Factors influencing the nucleation and crystal growth of solution-processed organic lead halide perovskites: a review," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 54, no. 16, no. 163001, 2021.
- [27] D. Pozebon, G. L. Scheffler, dan V. L. Dressler, "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*, vol. 32, no. 5, pp. 890-919, 2017.
- [28] Y. Wang et al., "Recent advances in electrocatalytic chloride oxidation for chlorine gas production," *Journal of Materials Chemistry A*, vol. 9, no. 35, pp. 18974-18993, 2021.
- [29] C. Degueldre, J. Bertsch, dan M. Martin, "Post irradiation examination of nuclear fuel: Toward a complete analysis," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 92, pp. 242-253, 2016.
- [30] K. Pianowska et al., "Solvent extraction as a method of recovery and separation of platinum group metals," *Materials*, vol. 16, no. 13, no. 4681, 2023.