

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

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



OPTIMASI PEMISAHAN SESIUM DI DALAM PELAT ELEMEN BAKAR TIPE U_3Si_2/Al PASCA IRADIASI MENGGUNAKAN METODE PENGENDAPAN KLOOROPLATINAT

Arif Nugroho¹, Komar Sutriah², Sri Mulijani², Triyono Basuki¹, Ahmad Ade Rofiqi², Noviarty¹, Helmi Fauzi Rahmatullah¹, Ganisa Kurniati Suryaman¹, Guswardani³

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

³Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran, Badan Riset dan Inovasi Nasional
Kawasan Sains dan Teknologi B.J Habibie Gd. 30, Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15314
e-mail: arif011@brin.go.id

(Naskah diterima: 13–03–2024, Naskah direvisi: 14–04–2024, Naskah disetujui: 17–04–2024)

ABSTRAK

OPTIMASI PEMISAHAN SESIUM DI DALAM PELAT ELEMEN BAKAR TIPE U_3Si_2/Al PASCA IRADIASI MENGGUNAKAN METODE PENGENDAPAN KLOOROPLATINAT. Beberapa metode pemisahan hasil fisi ^{137}Cs dengan uranium (^{238}U , ^{235}U , ^{236}U , dan ^{234}U) dalam bahan bakar U_3Si_2/Al telah banyak dikembangkan. Sebagai langkah awal pengembangan metode pemisahan sesium (Cs) yang baru, maka dilakukan optimasi dan pemisahan menggunakan metode pengendapan kloroplatinat. Metode yang dikembangkan pada penelitian ini menawarkan potensi hasil endapan sesium dengan kemurnian yang lebih tinggi. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan metode pemisahan isotop ^{137}Cs dari pelat PEB U_3Si_2/Al menggunakan reagen kloroplatinat. Langkah yang dilakukan adalah dengan melarutkan PEB U_3Si_2/Al pra iradiasi dan menambah beberapa unsur seperti Sm, Sr, Cs, dan Nd untuk mewakili unsur kandungan PEB pra iradiasi, seperti kondisi aslinya. Proses pengendapan Cs di dalam larutan supernatan dilakukan dengan menambahkan larutan HCl dan NaOH untuk memisahkan unsur pengotor dengan unsur sesium. Proses pengendapan dilakukan dengan menambahkan H_2PtCl_6 untuk mengendapkan dan memisahkan unsur Cs dan unsur yang lainnya. Optimasi proses pengendapan dilakukan dengan memvariasikan temperatur dan waktu pengendapan. Kondisi optimum proses pengendapan diperoleh pada temperatur $-3\text{ }^\circ\text{C}$ dan waktu 10 menit hal ini ditunjukkan dengan perolehan hasil endapan Cs_2PtCl_6 sebesar 0,3361 g. Analisis menggunakan XRD dan SEM digunakan untuk melengkapi dan memperkuat hasil pemisahan sesium menggunakan metode pengendapan kloroplatinat, yang hasilnya semua unsur terdistribusi merata. Kemurnian endapan Cs_2PtCl_6 yang diperoleh sebesar 100% dengan pola difraktogram sama dengan referensi.

Kata kunci: Kloroplatinat, pemisahan, pasca iradiasi, sesium, U_3Si_2/Al .

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF CESIUM SEPARATION IN POST-IRRADIATION U_3Si_2/Al TYPE FUEL ELEMENT PLATES USING THE CHLOROPLATINATE DEPOSITION METHOD. Several methods for separating fission product ^{137}Cs from uranium isotopes (^{238}U , ^{235}U , ^{236}U , and ^{234}U) in U_3Si_2/Al fuel have been widely developed. Optimization and separation were performed using the chloroplatinate precipitation to establish a new cesium (Cs) separation method. The method developed in this research offers the potential to achieve higher-purity cesium precipitates. This study aims to develop a method of separating the ^{137}Cs isotope from U_3Si_2/Al fuel element plates (PEB) using chloroplatinate reagents. The procedure involves dissolving the pre-irradiation U_3Si_2/Al PEB and adding several elements such as Sm, Sr, Cs, and Nd to represent the composition of pre-irradiation PEB, simulating its original condition. The cesium precipitation process in the supernatant solution was carried out by adding HCl and NaOH to separate impurities from cesium. The precipitation was conducted by adding H_2PtCl_6 to precipitate and isolate cesium from other elements. The precipitation process was optimized by varying the temperature and precipitation time. The optimum precipitation conditions were achieved at a temperature of $-3^\circ C$ and a time of 10 minutes, resulting in a Cs_2PtCl_6 precipitate weighing 0.3361 g. XRD and SEM analyses were used to complement and verify the cesium separation results using the chloroplatinate precipitation method, showing a uniform distribution of all elements. The purity of the Cs_2PtCl_6 precipitate obtained was 100%, with a diffractogram pattern identical to the reference.

Keywords: Chloroplatinate, separation, post-irradiation, cesium, U_3Si_2/Al .

Optimasi Pemisahan Sesium di Dalam Pelat Elemen Bakar Tipe U_3Si_2/Al Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Pengendapan Kloroplatinat.

(Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Noviyarty, Helmi Fauzi Rahmatullah, Ganisa Kurniati Suryaman, Guswardani)

PENDAHULUAN

Teknologi nuklir telah menjadi salah satu pilar utama dalam perkembangan sains dan teknologi modern, dengan memberikan kontribusi signifikan di berbagai bidang, termasuk energi, kedokteran, dan penelitian ilmiah [1]. Salah satu implementasi penting dari teknologi ini adalah analisis isotop radioaktif, seperti sesium-137 (^{137}Cs), yang dihasilkan sebagai produk samping dari reaksi fisi. Isotop ini memiliki waktu paruh panjang (30,17 tahun) dan stabilitas radioaktif yang membuatnya unggul dalam aplikasi jangka panjang [2],[3]. Keunggulan lain dari ^{137}Cs adalah bahwa isotop ini tidak bergantung pada parameter lain yang terpisah dari spektrum neutron, sehingga rasio $^{134}Cs/^{137}Cs$ berbanding lurus dengan fluks neutron yang mengiradiasi elemen bakar. Analisis isotop ini, khususnya untuk penentuan *burn up* pada pelat elemen bakar (PEB) U_3Si_2/Al , sangat relevan karena isotop tersebut membantu dalam pengukuran tingkat konsumsi bahan bakar nuklir setelah iradiasi. Nilai *burn up* dihitung dari hasil reaksi fisi dan dibandingkan dengan jumlah awal ^{235}U [4]. Namun, penentuan *burn up* menggunakan PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi berisiko adanya paparan radioaktif yang sangat berbahaya, sehingga diperlukan simulasi yang sifatnya mirip, yaitu penggunaan PEB U_3Si_2/Al pra-iradiasi [5].

Dalam konteks pemanfaatan isotop, kemurnian isotop merupakan faktor yang sangat penting. Kemurnian yang tinggi diperlukan untuk memastikan isotop berfungsi sesuai dengan tujuan, menghindari gangguan dari kontaminasi isotop lain, dan meningkatkan efektivitas penggunaannya [6]. Oleh karena itu, upaya untuk memperoleh isotop dengan kemurnian tinggi telah menjadi fokus utama dalam penelitian dan pengembangan teknologi pemisahan isotop.

Pemisahan isotop ^{137}Cs memerlukan pemahaman yang mendalam tentang sifat kimia dan fisika dari isotop tersebut. Dalam kasus bahan bakar U_3Si_2/Al , isotop ^{137}Cs sering ditemukan bercampur dengan isotop lain seperti uranium (^{238}U , ^{235}U , ^{236}U , dan ^{234}U), yang memerlukan teknik pemisahan yang tidak hanya efisien, tetapi juga harus mempertahankan stabilitas kimia isotop yang dipisahkan [7]. Stabilitas ini penting agar isotop tetap dapat digunakan dalam jangka panjang tanpa terjadi degradasi kimia yang dapat mempengaruhi fungsinya.

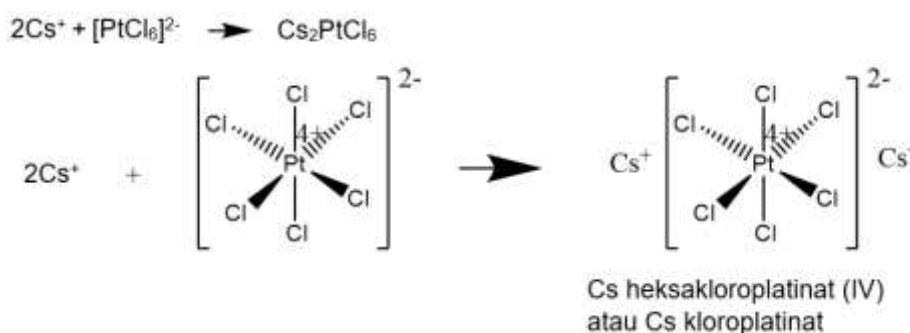
Namun, pemisahan isotop seperti ^{137}Cs bukanlah proses yang sederhana. Salah satu tantangan utama adalah kontaminasi dengan isotop lain atau ketidakstabilan kimia selama proses pemisahan, yang dapat mengurangi efektivitas isotop tersebut dalam aplikasinya [8]. Oleh karena itu, penelitian untuk mengembangkan metode pemisahan isotop yang lebih efisien sangat diperlukan, dengan fokus pada teknik yang memastikan kemurnian tinggi serta stabilitas jangka panjang.

Dalam hal teknik pemisahan, beberapa metode telah dikembangkan untuk meningkatkan kemurnian ^{137}Cs , seperti pertukaran ion, pengendapan kimia, dan teknik membran. Pertukaran ion menggunakan resin yang didesain untuk mengikat ^{137}Cs secara spesifik dari larutan campuran isotop. Resin ini bekerja dengan mengikat ion Cs^+ dari larutan, memungkinkan pemisahan dari ion lain yang mungkin bersaing dalam larutan. Namun, efektivitas metode ini bergantung pada kondisi operasi seperti konsentrasi ion lain yang bersaing, sehingga diperlukan optimasi yang hati-hati untuk mencapai hasil terbaik [8].

Selain pertukaran ion, metode pengendapan juga sangat bergantung pada penggunaan reagen yang dapat mempengaruhi kemurnian ^{137}Cs . Metode pengendapan atau pertukaran ion dengan reagen seperti zeolit, perklorat, dan resin Dowex sering kali menghasilkan kemurnian yang rendah atau bentuk yang tidak stabil [9]. Oleh karena itu, diperlukan metode yang lebih efektif, selektif, mampu menghasilkan kemurnian tinggi, serta bentuk yang stabil. Salah satu reagen yang berpotensi adalah garam platinum (H_2PtCl_6), yang dapat membentuk senyawa tidak larut dengan ion Cs^+ melalui pembentukan kompleks $[PtCl_6]^{2-}$. Metode ini menunjukkan hasil yang optimal dalam menghasilkan ^{137}Cs dengan kemurnian tinggi, asalkan kondisi reaksi seperti waktu dan temperatur pengendapan diatur dengan baik [10]. Penelitian sebelumnya [11] juga memisahkan sesium di dalam bahan bakar reaktor daya, namun tidak melibatkan temperatur dan waktu pengendapan yang optimal, sehingga penelitian ini mengoptimasi parameter pemisahan tersebut dari sampel PEB. Pemilihan variasi temperatur -11, -3, dan $20^\circ C$ didasarkan pada pengembangan studi sebelumnya yang tidak mencantumkan kuantitas temperatur sebenarnya. Sementara

penelitian lain [12] menggunakan pelat PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi dengan variasi penambahan $CsNO_3$ *carrier* sebagai pendukung proses pengendapan. Keunggulan metode ini adalah selektivitasnya yang tinggi terhadap Cs^+ , tanpa berinteraksi dengan ion lain seperti Sr^{2+} , yang sering juga ada dalam campuran hasil fisi.

Selektivitas metode ini terhadap Cs^+ dapat dijelaskan melalui perbedaan sifat kimia dan konfigurasi elektron antara Cs^+ dan ion lain, seperti Sr^{2+} . Cs memiliki konfigurasi elektron $[Xe] 6s^1$, sementara Sr memiliki konfigurasi $[Kr] 5s^2$. Perbedaan ini menghasilkan ukuran jejari atom yang lebih besar untuk Cs dibandingkan Sr , sehingga meningkatkan sifat elektropositif ion Cs^+ . Akibatnya, ion Cs^+ lebih mudah diikat oleh kompleks $[PtCl_6]^{2-}$ dibandingkan Sr^{2+} [13].



Gambar 1. Reaksi pengikatan ion Cs dengan ion $[PtCl_6]^{2-}$

Namun, tantangan tetap ada dalam memastikan kemurnian dan stabilitas isotop ^{137}Cs setelah pemisahan. Kelarutan tinggi ^{137}Cs dalam air, terutama dalam bentuk garam seperti $CsCl$, memerlukan perhatian khusus dalam penyimpanan untuk mencegah degradasi atau kontaminasi lebih lanjut [15]. Penyimpanan yang tepat dan kondisi reaksi yang terkendali penting untuk memastikan isotop ini tetap dalam keadaan stabil dan murni.

Selain stabilitas kimia, pemilihan reagen yang tepat memainkan peran penting dalam keberhasilan isolasi isotop. Reagen yang efektif harus mampu secara selektif mengikat isotop ^{137}Cs , sambil mempertahankan stabilitas isotop tersebut setelah pemisahan. Hal ini penting untuk memastikan bahwa isotop ^{137}Cs yang telah diisolasi tidak mengalami degradasi selama penyimpanan atau penggunaan lebih lanjut [16].

Sifat elektropositif adalah kemampuan suatu atom untuk melepaskan elektron terluar dan membentuk kation. Ion Cs , dengan jejari atom yang lebih besar dan lebih elektropositif, lebih mudah berikatan dengan spesi atau ion yang bermuatan negatif [14]. Sebaliknya, $[PtCl_6]^{2-}$, dengan enam atom Cl^- yang bersifat elektronegatif, cenderung lebih dominan dalam berikatan dengan ion yang lebih elektropositif. Oleh karena itu, ion kompleks $[PtCl_6]^{2-}$ memiliki afinitas yang lebih tinggi terhadap Cs^+ dibandingkan dengan Sr^{2+} . Hal ini menunjukkan bahwa Cs^+ memiliki afinitas lebih tinggi dalam mengikat ion kompleks $[PtCl_6]^{2-}$ dibandingkan Sr^{2+} . Reaksi kloroplatinat dengan Cs diilustrasikan pada Gambar 1.

Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan pada pemisahan isotop ^{137}Cs dari pelat PEB U_3Si_2/Al menggunakan reagen kloroplatinat. Dalam proses ini, pengaturan temperatur, waktu reaksi, dan kondisi pengendapan sangat penting untuk mencapai kemurnian isotop yang tinggi [17]. Pendekatan yang sistematis dalam optimasi parameter-parameter ini diharapkan dapat menganalisis ^{137}Cs dengan tingkat kemurnian dan stabilitas yang memadai untuk aplikasi lanjutan.

METODOLOGI

Alat yang digunakan yaitu peralatan kaca laboratorium, hotplate, oven, corong Buchner, botol sampel, penangas es, *scanning electron microscope* (SEM) (Jeol), dan XRD (*X-Ray Diffraction*) (Panalytical). Sementara, bahan yang digunakan meliputi sampel PEB U_3Si_2/Al pra iradiasi HCl , larutan Sm , Cs , Sr , dan Nd , $CsNO_3$ (sesium nitrat), larutan Fe , $NaOH$, indikator methyl red,

Optimasi Pemisahan Sesium di Dalam Pelat Elemen Bakar Tipe U_3Si_2/Al Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Pengendapan Kloroplatinat.
(Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Noviarthy, Helmi Fauzi Rahmatullah, Ganisa Kurniati Suryaman, Guswardani)

H_2PtCl_6 (asam heptakloroplatinat), etanol, dan aquades.

Sebanyak 0,067 g PEB U_3Si_2/Al pra iradiasi dilarutkan dengan HCl 6 M 5 mL dan HNO_3 6 M 5 mL. Sampel larutan uranil nitrat diambil 100 μ L untuk digunakan sebagai sampel PEB. Selanjutnya, larutan ini ditambahkan bahan standard Sm, Cs, Sr, dan Nd agar menyerupai larutan U_3Si_2/Al pasca iradiasi. Preparasi sampel dimulai dengan menimbang berat *beaker* gelas kosong. Kemudian, 100 μ L sampel PEB pra iradiasi dimasukkan ke *beaker* gelas, diikuti penambahan 2 mL HCl 1 M dan 20 mL larutan Sm, Cs, Sr, dan Nd dengan konsentrasi 1100 ppm (sesuai LoD XRF). Selanjutnya, $CsNO_3$ *carrier* dan 2 tetes larutan Fe ditambahkan, lalu NaOH diteteskan hingga terbentuk endapan cokelat. Larutan ini dipanaskan hingga mendidih dan mengental, kemudian didinginkan selama 5 menit. Larutan dipisahkan dari endapan menggunakan corong *Buchner*. Endapan ditampung pada wadah terpisah, sementara supernatan dipindahkan ke gelas *beaker* [11],[12].

Supernatan dalam *beaker* ditambahkan 3 tetes indikator *methyl red*, kemudian HCl diteteskan sambil diaduk hingga warna merah muncul. Selanjutnya, ditambahkan 2 tetes larutan Fe dan NaOH hingga endapan cokelat terbentuk. Larutan dipanaskan kembali hingga mendidih dan mengental, lalu didinginkan selama 5 menit dan dipisahkan menggunakan corong *Buchner*. Larutan yang tersisa di *beaker* ditambahkan HCl secara bertahap hingga berubah warna menjadi merah, kemudian dimasukkan ke dalam penangas es dan ditambahkan 2 mL H_2PtCl_6 . Pada proses pengendapan dilakukan variasi temperatur -11°C (media es batu dan garam), -3°C (media es batu), dan 20°C (temperatur ruangan) dan waktu (5, 10, dan 30 menit) pengendapan. Hal ini merupakan optimasi pemisahan dari metode sebelumnya [11],[12]. Endapan yang terbentuk dipisahkan dari *supernatan* menggunakan corong *Buchner*, dan *supernatan* ditampung sebagai sampel asli. Endapan dalam corong *Buchner* dicuci dengan 5 mL air, dan 5 mL etanol, dan dikeringkan pada temperatur ruang selama 15 menit, sedangkan *supernatan* diambil kembali untuk dianalisis [11],[12].

Pemeriksaan mikrostruktur endapan Cs_2PtCl_6 dilakukan dengan SEM dengan perbesaran 500, 1000, 5000, dan 10.000 kali

yang dilengkapi dengan *energy dispersive spectrometer* (EDS). Pengujian lebih lanjut yaitu analisis mikrostruktur menggunakan difraksi sinar-X (XRD) yang hasilnya dianalisis dengan metode *Rietveld* menggunakan *software high score, step size 0,0200*, material anoda Cu, lambda 1,54, dan rentang 2θ : 20 sampai dengan 80°.

HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Difraktogram Cs_2PtCl_6

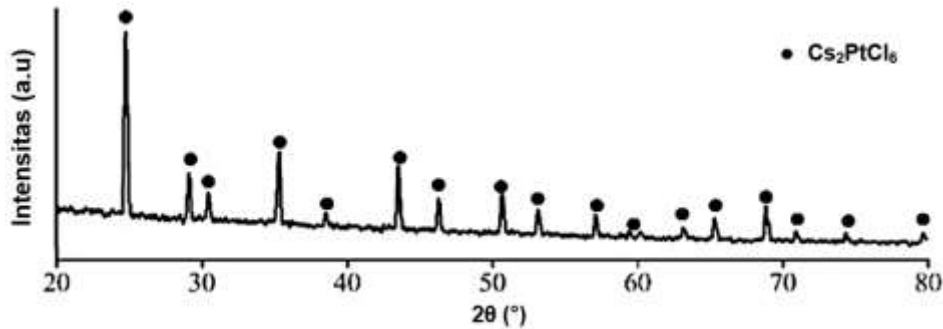
Unsur sesium dari PEB U_3Si_2/Al pra iradiasi telah berhasil dipisahkan dan dianalisis menggunakan metode pengendapan dan difraksi sinar-X (XRD). Dalam penelitian ini, berbagai reagen dipilih secara spesifik untuk memastikan proses pemisahan sesium berjalan dengan baik dan menghasilkan hasil yang akurat. Asam klorida (HCl) 1 M menurunkan pH sampel, memfasilitasi pelarutan senyawa, serta mempersiapkan larutan untuk reaksi selanjutnya [18]. Larutan Sm, Cs, Sr, dan Nd dengan konsentrasi 1100 ppm ditambahkan untuk menyerupai kondisi PEB pasca iradiasi [19]. Pemilihan konsentrasi didasarkan pada kemampuan alat XRF dalam mendeteksi sampel. Namun, analisis kuantitatif unsur tersebut tidak dilakukan menggunakan XRF di laboratorium kami, dikarenakan alat tersebut mengalami kerusakan, sehingga dicoba menggunakan XRF lain, namun LoD alat lebih besar dibanding konsentrasi sampel. Sesium nitrat ($CsNO_3$) berfungsi sebagai *carrier* sesium, mempermudah pemisahan dan konsentrasi sesium dari unsur lain dalam sampel. Selain itu, larutan besi (Fe) membentuk endapan cokelat yang signifikan dalam memisahkan sesium dari supernatan, sedangkan natrium hidroksida (NaOH) digunakan untuk menetralkan pH larutan dan membantu pembentukan endapan tersebut.

Dikarenakan analisis kualitatif dan kuantitatif tidak dilakukan menggunakan XRF, maka karakterisasi endapan Cs_2PtCl_6 dilakukan menggunakan XRD untuk menentukan kristalinitas senyawa tersebut. Analisis sesium menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) melibatkan asam kloroplatinat (H_2PtCl_6) untuk mengendapkan sesium sebagai Cs_2PtCl_6 , yang kemudian mempermudah pemisahan sesium dari larutan. Setelah pengendapan, endapan dicuci dengan etanol untuk menghilangkan

kontaminan dan memastikan kemurnian sebelum dilakukan analisis lebih lanjut.

Berbagai kondisi reagen yang digunakan menghasilkan endapan sesium kloroplatinat (IV) (Cs_2PtCl_6), yang dibuktikan melalui difraktogram hasil analisis XRD. Puncak-puncak difraksi teridentifikasi pada

sudut 2θ antara 20° hingga 80° , dengan 13 puncak utama, yaitu pada 2θ : $24,79^\circ$; $29,13^\circ$; $30,45^\circ$; $35,29^\circ$; $38,55^\circ$; $43,53^\circ$; $46,29^\circ$; $50,67^\circ$; $53,19^\circ$; $57,11^\circ$; $63,09^\circ$; $65,29^\circ$; dan $68,85^\circ$, sesuai dengan pola difraksi kristal Cs_2PtCl_6 yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Difraktogram Cs_2PtCl_6 dengan penambahan Fe

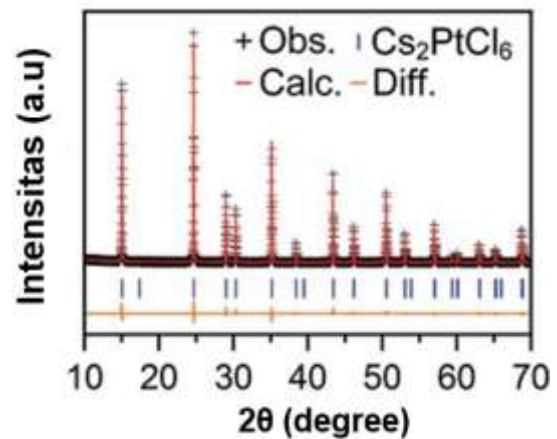
Hal ini mengindikasikan bahwa proses pengendapan menggunakan H_2PtCl_6 berhasil memisahkan sesium secara efektif. Meskipun difraktogram menunjukkan bahwa Cs_2PtCl_6 telah berhasil terbentuk, kondisi temperatur dan waktu pengendapan dalam percobaan ini belum dioptimalkan. Oleh karena itu, perlu dilakukan optimasi lebih lanjut agar pengendapan Cs_2PtCl_6 dapat menghasilkan kemurnian yang lebih tinggi dalam kondisi optimal.

Puncak-puncak ini menandakan bahwa Cs_2PtCl_6 adalah fase dominan dalam sampel, karena tidak terdeteksi adanya fase lain. 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 3 [20].

b. Optimasi Temperatur dan Waktu Pengendapan

Hasil pengukuran berat endapan Cs_2PtCl_6 (g) diperoleh dari variasi temperatur dan waktu pengendapan. Pengaruh temperatur terhadap massa endapan Cs_2PtCl_6 pada tiga kondisi temperatur berbeda, yaitu $-3^\circ C$, $20^\circ C$, dan $-11^\circ C$, menunjukkan bahwa temperatur $-3^\circ C$ menghasilkan berat endapan terbesar, dengan rata-rata 0,3843 g. Temperatur $-11^\circ C$ menghasilkan berat rata-rata 0,2798 g, dan temperatur $20^\circ C$ menghasilkan berat endapan terendah, yaitu 0,2628 g, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 dan Gambar 4.

Hal ini mengindikasikan bahwa penurunan temperatur menyebabkan peningkatan berat endapan, kemungkinan karena kelarutan Cs_2PtCl_6 yang menurun pada temperatur rendah, sehingga mempercepat pengendapan [21].

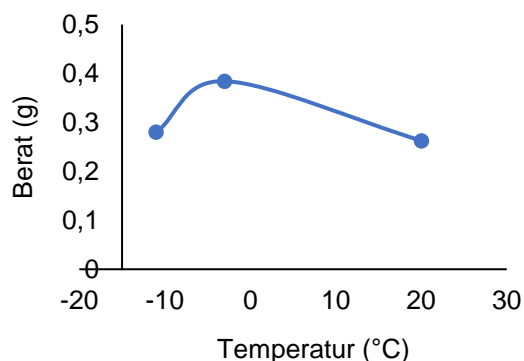


Gambar 3. Pola difraksi Cs_2PtCl_6 rujukan [20]

Tabel 1. Pengaruh variasi temperatur terhadap bobot endapan Cs_2PtCl_6

Temperatur ($^\circ C$)	Sampel	Bobot Endapan (g)	Rerata (g)
-11	A1	0,2871	0,2798
	A2	0,2724	
-3	B1	0,3746	0,3843
	B2	0,3939	
20	C1	0,2535	0,2628
	C2	0,2721	

Optimasi Pemisahan Sesium di Dalam Pelat Elemen Bakar Tipe U_3Si_2/Al Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Pengendapan Kloroplatinat.
(Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Noviarty, Helmi Fauzi Rahmatullah, Ganisa Kurniati Suryaman, Guswardani)



Gambar 4. Kurva pengaruh temperatur terhadap berat endapan Cs_2PtCl_6 .

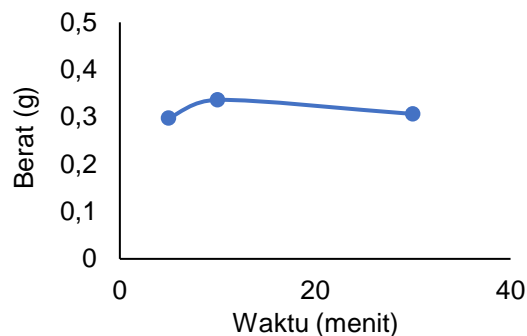
Selain temperatur, pengaruh waktu pengendapan juga diteliti pada interval waktu 5, 10, dan 30 menit. Pengendapan selama 10 menit menghasilkan berat endapan terbesar, dengan rata-rata 0,3361 g, diikuti oleh pengendapan selama 30 menit yang menghasilkan rata-rata 0,3063 g, dan pengendapan selama 5 menit dengan rata-rata 0,2975 g seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2 dan Gambar 5. Hasil ini menunjukkan bahwa waktu pengendapan selama 10 menit adalah yang paling optimal. Setelah 10 menit, peningkatan durasi waktu pengendapan tidak lagi memberikan pengaruh signifikan terhadap massa endapan yang terbentuk. Hal ini menunjukkan bahwa proses pengendapan mendekati kesetimbangan setelah waktu tersebut.

Tabel 2. Pengaruh variasi waktu terhadap bobot endapan Cs_2PtCl_6

Waktu (menit)	Sampel	Bobot endapan (g)	Rerata (g)
5	A1	0,2948	0,2975
	A2	0,3002	
10	B1	0,3381	0,3361
	B2	0,3340	
30	C1	0,3013	0,3063
	C2	0,3112	

Secara keseluruhan, hasil eksperimen menunjukkan bahwa pada temperatur rendah (-3°C) dengan waktu pengendapan 10 menit merupakan kondisi yang paling efektif untuk menghasilkan massa endapan Cs_2PtCl_6 yang maksimal. Temuan ini penting untuk mengoptimalkan metode pengendapan

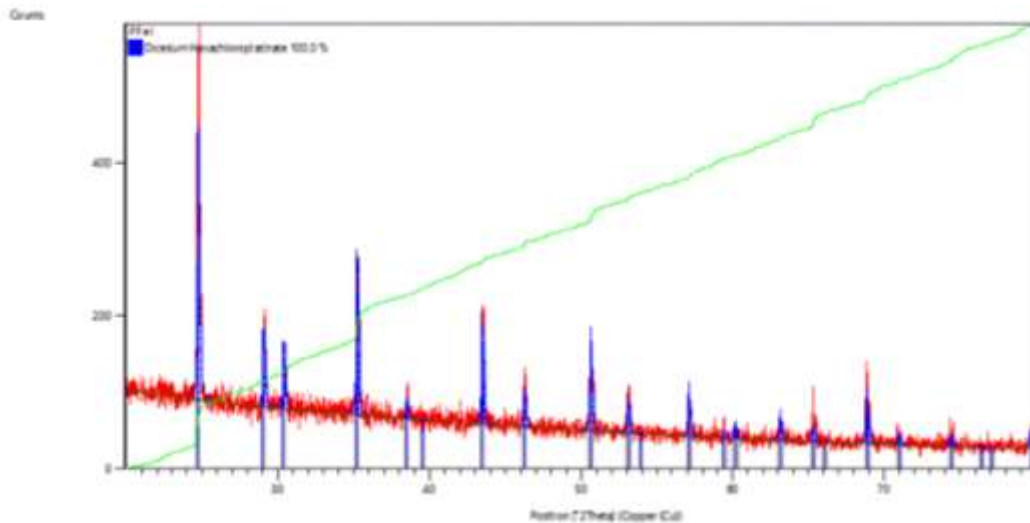
kloroplatinat dalam pemisahan isotop Cs, di mana pengaturan temperatur dan waktu pengendapan menjadi faktor penentu dalam meningkatkan efisiensi pemisahan.



Gambar 5. Kurva pengaruh waktu terhadap berat endapan Cs_2PtCl_6 .

c. Karakterisasi dan Kuantisasi Senyawa Cs_2PtCl_6

Pola XRD dari Cs_2PtCl_6 dengan kemurnian 100% dihasilkan dari analisis intensitas sinar-X yang terdifraksi pada berbagai sudut 2θ dalam rentang 10° hingga 80° di antaranya $24,7583^\circ$, $24,8205^\circ$, $29,0950^\circ$, $29,1685^\circ$, $30,4131^\circ$, $30,4902^\circ$, $35,2391^\circ$, $35,3292^\circ$, $38,5069^\circ$, $38,6060^\circ$, $39,5446^\circ$, $39,6466^\circ$, $43,4874^\circ$, $43,6006^\circ$, $46,2643^\circ$, $46,3856^\circ$, $50,6275^\circ$, $50,7618^\circ$, $53,1169^\circ$, $53,2589^\circ$, $53,9286^\circ$, $54,0731^\circ$, $57,0958^\circ$, $57,2504^\circ$, $59,3979^\circ$, $59,5600^\circ$, $60,1530^\circ$, dan $60,3175^\circ$ (Gambar 6). Puncak-puncak difraksi ini mengindikasikan adanya struktur kristal yang teratur dalam senyawa Cs_2PtCl_6 . Intensitas yang tinggi pada puncak-puncak tersebut menunjukkan bahwa orientasi kristal Cs_2PtCl_6 mendominasi difraksi yang terukur. Sesuai dengan referensi pola difraksi yang diharapkan untuk senyawa Cs_2PtCl_6 , tidak terdeteksi adanya fase lain yang signifikan, yang mengindikasikan bahwa sampel memiliki kemurnian tinggi (100%) dan tidak mengalami kontaminasi selama proses sintesis, yang diinterpretasikan oleh garis linier pada grafik. Berdasarkan hasil ini, dapat dikatakan bahwa senyawa Cs_2PtCl_6 yang dihasilkan memiliki struktur kristal yang sesuai dengan standar dan tidak terpengaruh oleh pengotor atau fase tambahan, sehingga metode sintesis yang digunakan berhasil mempertahankan kemurnian dan struktur material.



Gambar 6. Pola difraksi sinar-X (XRD) dari Cs_2PtCl_6

Pola difraksi yang teridentifikasi dari Cs_2PtCl_6 memiliki nilai skor sebesar 67, yang mengindikasikan kecocokan yang baik antara pola difraksi eksperimen dengan referensi (Tabel 3). Skor ini menunjukkan bahwa senyawa yang dihasilkan dalam penelitian memiliki kemiripan tinggi dengan senyawa yang ada dalam database, mengonfirmasi bahwa fasa utama dalam sampel adalah Cs_2PtCl_6 . Angka 67 tersebut banyak disumbang dari bagian di luar rentang sudut 2θ antara $20-80^\circ$ dikarenakan *scanning*-nya antara $20-80^\circ$, maka puncak $< 20^\circ$ dan $> 80^\circ$ tidak terdeteksi dan puncak di antara $20-80^\circ$ telah teridentifikasi semua. Hasil ini terdapat perbedaan antara hasil XRD dengan database karena efek dari alat ataupun materialnya, sehingga dapat diasumsikan

bahwa fase yang diperoleh adalah fase tunggal.

Pola difraksi yang teridentifikasi dari Cs_2PtCl_6 memiliki nilai *displacement* atau pergeseran 2θ yang tercatat adalah 0,000 yang menandakan tidak adanya pergeseran signifikan antara pola difraksi eksperimen dan pola referensi. Faktor skala yang diperoleh sebesar 0,605, menunjukkan intensitas relatif dari senyawa ini dibandingkan dengan fase-fase lain yang mungkin ada dalam sampel. Komposisi kimia yang diidentifikasi untuk senyawa ini adalah Cl_6Cs_2Pt , yang sesuai dengan struktur yang diharapkan untuk Cs_2PtCl_6 . Data ini semakin memperkuat hasil bahwa senyawa yang disintesis dalam penelitian ini memiliki struktur kristal dan komposisi kimia yang sesuai dengan standar referensi.

Tabel 3. Pola yang teridentifikasi dari XRD

Visible	Ref. Code	Score	Compound Name	Displacement [$^{\circ} 2\theta$]	Scale Factor	Chemical Formula
*	98-002-6709	67	Dicesium Hecachloroplatinat	0,000	0,605	$Cl_6 Cs_2 Pt_1$

Hasil analisis XRD yang digunakan untuk mengidentifikasi fase-fase kristalin dalam sampel hasil pengendapan kloroplatinat disajikan dalam bentuk perbandingan kurva sampel dan referensi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7. Kurva berwarna oranye merupakan pola difraksi sinar-X yang diperoleh dari sampel penelitian, sementara kurva berwarna biru menunjukkan pola difraksi referensi yang diambil dari database kristalografi. Pola

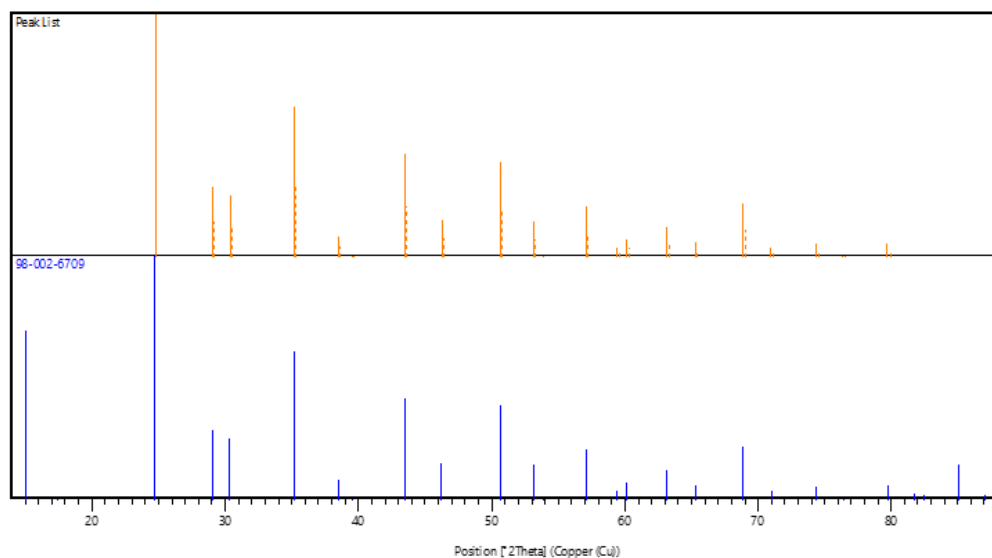
difraksi ini digunakan untuk membandingkan fase yang teridentifikasi dengan fase standar yang diharapkan, dalam hal ini, senyawa Cs_2PtCl_6 .

Puncak-puncak pada kurva oranye yang muncul pada sudut-sudut tertentu (2θ) mencerminkan interaksi sinar-X dengan bidang-bidang kristal dalam struktur sampel. Dengan mencocokkan puncak-puncak ini dengan pola referensi yang ada pada kurva biru, diinterpretasikan bahwa struktur kristal

Optimasi Pemisahan Sesium di Dalam Pelat Elemen Bakar Tipe U_3Si_2/Al Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Pengendapan Kloroplatinat.
(Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Noviarty, Helmi Fauzi Rahmatullah, Ganisa Kurniati Suryaman, Guswardani)

Cs_2PtCl_6 berhasil diidentifikasi dalam sampel. Kesamaan antara pola difraksi sampel dengan pola referensi menunjukkan bahwa metode pengendapan yang digunakan dalam penelitian ini berhasil menghasilkan senyawa

Cs_2PtCl_6 yang diinginkan. Hasil ini juga memperkuat hipotesis bahwa metode pemisahan isotop ^{137}Cs melalui pengendapan kloroplatinat efektif dalam menghasilkan produk kristal dengan kemurnian tinggi.



Gambar 7. Perbandingan pola pada analisis XRD sampel dan referensi database

Gambar 8 dan 9 merupakan morfologi dari analisis SEM pada temperatur dan waktu pengendapan $-3\text{ }^{\circ}C$ dan 10 menit. Hasil karakterisasi permukaan material menggunakan SEM pada perbesaran 500x dan 1000x (Gambar 8.a dan 8.b), terlihat struktur kristal dengan morfologi yang berbentuk seperti batang dengan permukaan berlapis. Bentuk ini menunjukkan adanya pertumbuhan kristal yang teratur, yang dapat disebabkan oleh kondisi pertumbuhan yang stabil selama sintesis material.

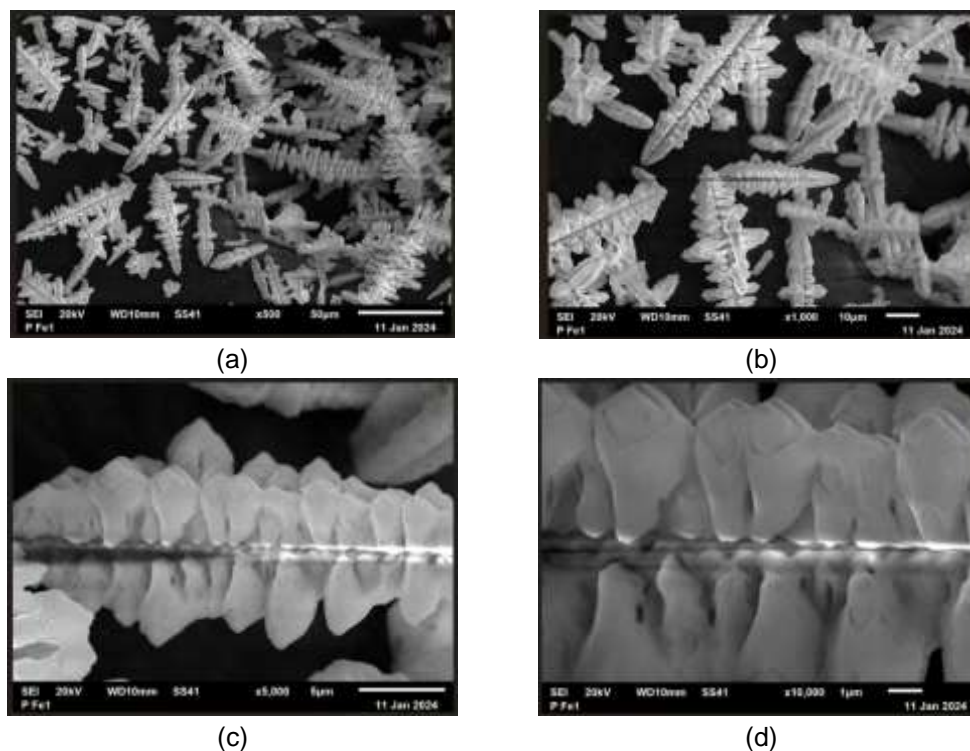
Perbesaran yang lebih tinggi, yaitu 5000x dan 10.000x (Gambar 8.c dan 8.d), morfologi kristal tersebut tampak lebih jelas dan detail yang lebih rinci dari struktur lapisan kristal. Tampak bahwa kristal memiliki geometri yang berulang dengan bentuk yang simetris, mengindikasikan proses pembentukan yang konsisten. Garis batas yang terlihat pada bagian tengah struktur kristal pada perbesaran 10.000x menunjukkan kemungkinan adanya orientasi pertumbuhan

yang dipengaruhi oleh faktor eksternal, seperti temperatur atau waktu selama proses sintesis.

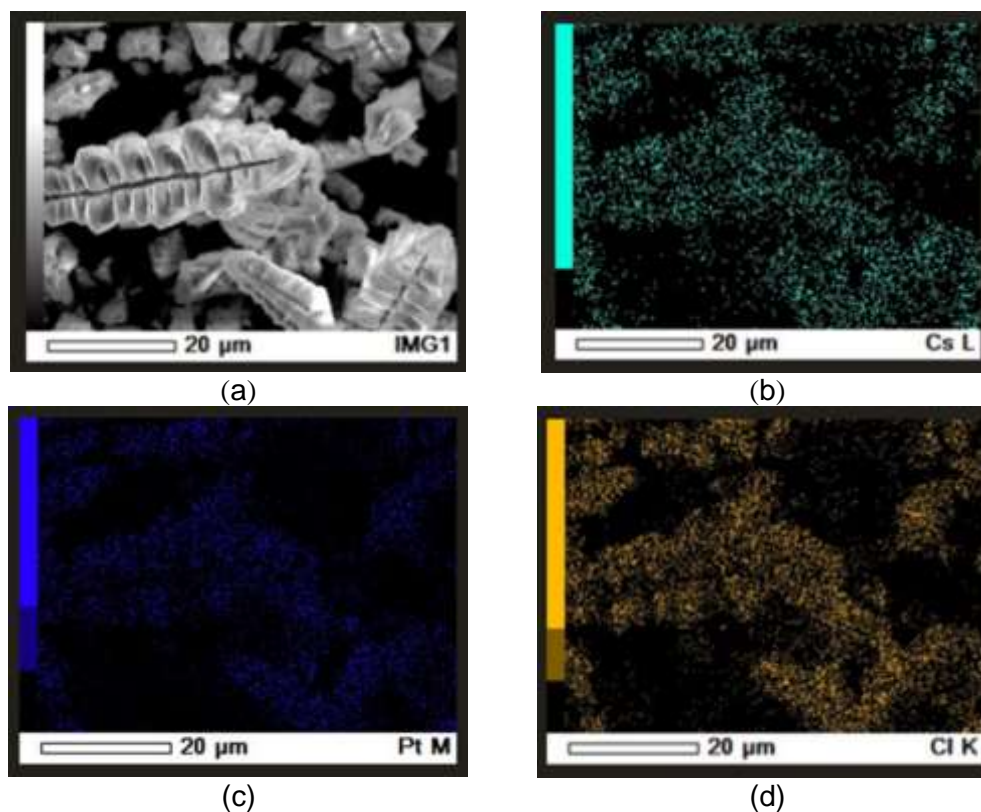
Secara keseluruhan, hasil karakterisasi ini menunjukkan bahwa material yang dihasilkan memiliki struktur kristal yang teratur dengan tingkat kemurnian yang tinggi, serta morfologi yang dapat dihubungkan dengan sifat-sifat fisik dan kimia material tersebut.

Analisis SEM dengan pemetaan (*mapping*) elemen pada senyawa Cs_2PtCl_6 menunjukkan distribusi unsur-unsur penyusunnya, yaitu sesium (Cs), platinum (Pt), dan klorin (Cl). Struktur morfologi dari material Cs_2PtCl_6 membentuk permukaan yang menyerupai partikel-partikel tidak beraturan (Gambar 9.a). Distribusi unsur Cs, Pt, dan Cl tersebar merata dalam material (Gambar 9.b, 9.c, dan 9.d). Distribusi ini mengonfirmasi bahwa ketiga unsur tersebut terikat dalam struktur kompleks Cs_2PtCl_6 dengan penyebaran yang homogen, sesuai dengan komposisi kimianya.

Optimasi Pemisahan Sesium di Dalam Pelat Elemen Bakar Tipe U_3Si_2/Al Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Pengendapan Kloroplatinat
(Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Noviarty, Helmi Fauzi Rahmatullah, Ganisa Kurniati Suryaman, Guswardani)



Gambar 8. Karakterisasi menggunakan SEM pada perbesaran 500x (a); 1000x (b); 5000x (c); dan 10.000x (d).

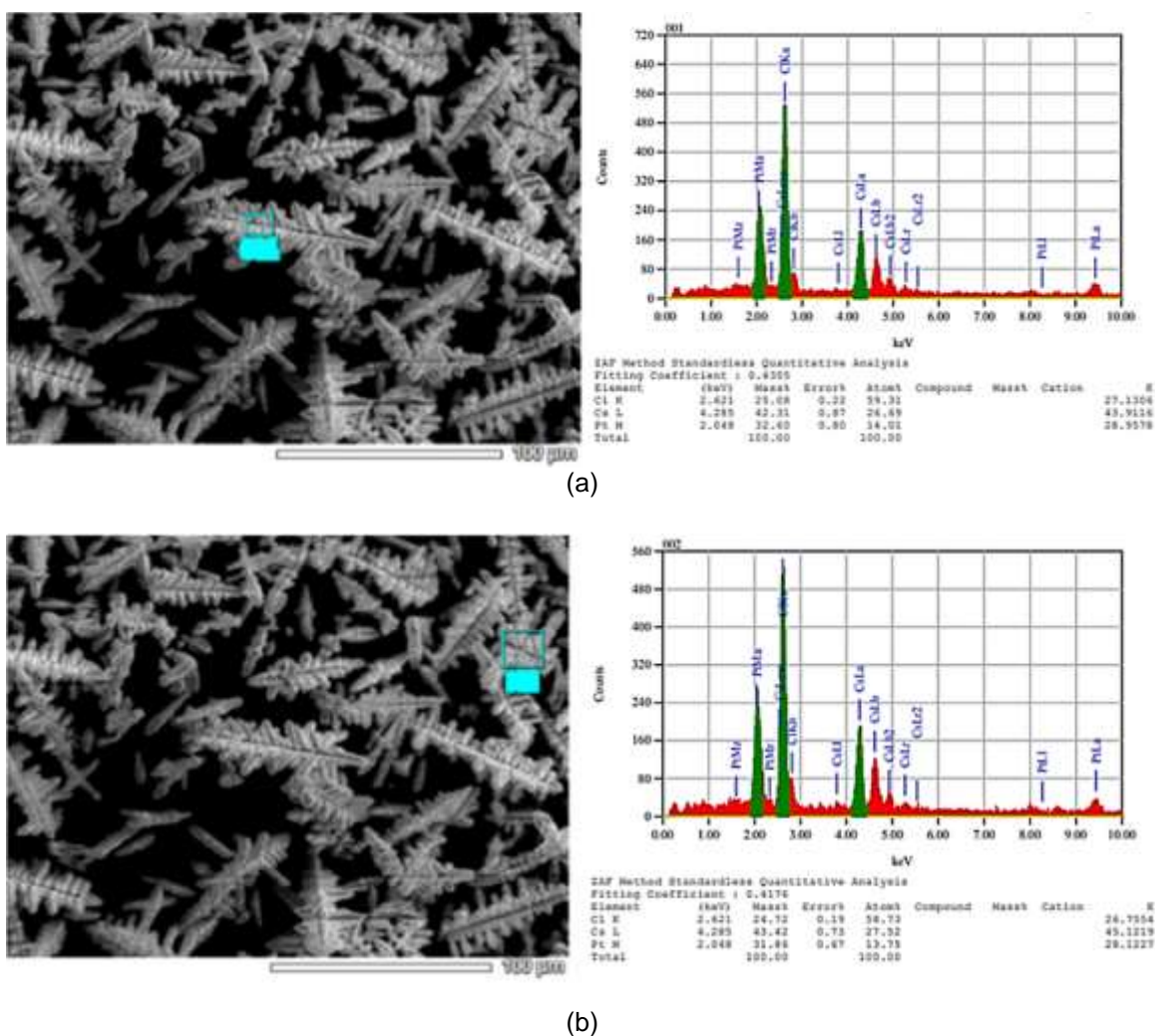


Gambar 9. Karakterisasi menggunakan SEM yang diperoleh dari mapping Cs_2PtCl_6 (a); distribusi unsur Cs (b); distribusi unsur Pt (c); dan distribusi unsur Cl (d).

Optimasi Pemisahan Sesium di Dalam Pelat Elemen Bakar Tipe U_3Si_2/Al Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Pengendapan Kloroplatinat.
 (Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Noviyarty, Helmi Fauzi Rahmatullah, Ganisa Kurniati Suryaman, Guswardani)

Berdasarkan data kuantifikasi posisi 1 dan 2 yang ditunjukkan pada Gambar 10, komposisi unsur dalam senyawa Cs_2PtCl_6 ditampilkan dalam persentase massa (mass%) dan atom (atomic%). Unsur Cs memiliki komposisi massa sebesar 42,3 dan 43,42% dengan persentase atom 26,69 dan 27,52%, menunjukkan bahwa sesium merupakan unsur yang dominan dalam material ini. Pt menyusun 32,06 dan 31,86% massa material dengan persentase atom 14,01 dan 13,75%, yang jumlah atomnya lebih

sedikit dibandingkan dengan Cs. Terakhir, Cl menyumbang 25,08 dan 24,72% dari massa dengan persentase atom 59,31 dan 58,73%, menunjukkan bahwa klorin ada dalam jumlah atom yang lebih banyak, yang masih sesuai dengan perannya sebagai anion dalam struktur senyawa ini. Perbandingan ini sesuai dengan rumus kimia Cs_2PtCl_6 , di mana 2 atom Cs, 1 atom Pt, dan 6 atom Cl diharapkan sesuai dengan komposisi yang terukur melalui analisis kuantitatif, baik dari segi massa maupun atom.



Gambar 10. Kuantitas sampel Cs_2PtCl_6 pada posisi 1 (a) dan posisi 2 (b)

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil memisahkan Cs di dalam PEB U_3Si_2/Al pasca iradiasi melalui karakterisasi senyawa Cs_2PtCl_6 menggunakan metode pengendapan kloroplatinat. Karakterisasi dilakukan dengan

analisis SEM dan pemetaan elemen, yang hasilnya mengonfirmasi distribusi yang merata dari unsur-unsur penyusun material, sehingga sesuai dengan komposisi kimia teoritis. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode pengendapan dengan reagen

yang digunakan dapat menghasilkan senyawa dengan struktur dan kemurnian 100%, sehingga dapat diterapkan pada aplikasi yang relevan dalam pemisahan ion dan studi material berbasis kompleks logam transisi.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada Kepala Pusat Riset Teknologi Bahan Nuklir Dan Limbah Radioaktif yang telah mengakomodasi penelitian ini melalui pendanaan rumah program HITN nomor 24/III.2/HK/2023.

KONTRIBUTOR PENULIS

Sebagai kontributor utama dalam naskah ini adalah Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Noviarthy, Helmi Fauzi Rahmatullah, dan Ganisa Kurniati Suryaman, sedangkan Guswardani bertindak sebagai kontributor anggota.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] J. K. Shultis, D. S. McGregor, dan R. E. Faw, *Fundamentals of Nuclear Science and Engineering*, Boca Raton, FL: CRC Press, 2016.
- [2] M. Pfützner, M. Karny, L. V. Grigorenko, dan K. Riisager, "Radioactive decays at limits of nuclear stability," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 84, no. 2, pp. 567–619, 2012.
- [3] I. U. Khan, W. Sun, dan E. Lewis, "Assessment of anthropogenic Cesium-137 in soil of Islamabad capital territory and its suburbs, Pakistan," *Int. J. Radiat. Res.*, vol. 19, no. 2, pp. 325–332, 2021.
- [4] H. Suseno, "Bioakumulasi ^{137}Cs oleh siput air tawar (*Pila ampullacea*) melalui jalur air: Pengaruh pH perairan dan ukuran biota terhadap biokinetika ^{137}Cs ," *J. Teknol. Pengelolaan Limbah*, vol. 16, no. 1, 2014.
- [5] M. A. Ashraf, S. Akib, M. J. Maah, I. Yusoff, dan K. S. Balkhair, "Cesium-137: Radio-chemistry, fate, and transport, remediation, and future concerns," *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.*, vol. 44, no. 15, pp. 1740–1793, 2014.
- [6] M. Liezers, O. T. Farmer III, M. P. Dion, M. L. Thomas, dan G. C. Eiden, "The production of ultra-high purity single isotopes or tailored isotope mixtures by ICP-MS," *Int. J. Mass Spectrom.*, vol. 376, pp. 58–64, 2015.
- [7] T. Xenofontos, "Development of a dynamic stochastic neutronic code for the analysis of conventional and hybrid nuclear reactors," disertasi, Université Paris Saclay (COMUE); Université Aristote (Thessalonique, Grèce), 2018.
- [8] Y. Cao, L. Zhou, H. Ren, dan H. Zou, "Determination, separation and application of ^{137}Cs : A review," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 16, 10183, 2022.
- [9] A. Murali, Z. Zhang, M. L. Free, dan P. K. Sarswat, "A comprehensive review of selected major categories of lithium isotope separation techniques," *Phys. Status Solidi (a)*, vol. 218, no. 19, 2100340, 2021.
- [10] I. D. Cahyati, H. Hendrawati, dan G. F. Amri, "Analysis of Cs-137 radionuclide on the East Jakarta flood canal water samples using gamma spectrometer," *J. Sains Teknol. Nuklir Indones.*, vol. 22, no. 2, pp. 47–51, 2022.
- [11] H. Okashita and H. Natsume, "A comparison of radiochemical methods for cesium-137 determination," *Journal of Nuclear Science and Technology* [Publish Online], vol. 9, no. 4, pp. 241–248, 2012, doi: 10.1080/18811248.1972.9734836.
- [12] A. Nugroho *et al.*, "Pemisahan cesium dalam PEB U_3Si_2/Al densitas 2,96 gU/cm^3 pasca iradiasi dengan metode pengendapan Chloroplatinate," *Jurnal Daur Bahan Bakar Nuklir Urania*, vol. 25, no. 2, pp. 71–140, 2019.
- [13] J. J. Nelson dan E. J. Schelter, "Sustainable inorganic chemistry: Metal separations for recycling," *Inorg. Chem.*, vol. 58, no. 2, pp. 979–990, 2019.
- [14] A. G. Naumovets, "Adsorption of alkali and other electropositive metals," in *Surface and Interface Science*, 1st ed., vol. 5, pp. 157–206, 2016.
- [15] M. Pomper, E. Murauskaite, dan T. Coppen, "Promoting alternatives to high-risk radiological sources: The case of cesium chloride in blood irradiation," *James Martin Center for Nonproliferation Studies (CNS)*, 2014.
- [16] B. C. Russell, I. W. Croudace, dan P. E. Warwick, "Determination of ^{135}Cs and ^{137}Cs in environmental samples:

Optimasi Pemisahan Sesium di Dalam Pelat Elemen Bakar Tipe U_3Si_2/Al Pasca Iradiasi Menggunakan Metode Pengendapan Kloroplatinat.

(Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Noviarty, Helmi Fauzi Rahmatullah, Ganisa Kurniati Suryaman, Guswardani)

- A review," *Anal. Chim. Acta*, vol. 890, pp. 7–20, 2015.
- [17] M. Boudias, A. Gourgiotis, G. Montavon, C. Cazala, V. Pichon, dan N. Delaunay, " ^{226}Ra and ^{137}Cs determination by inductively coupled plasma mass spectrometry: State of the art and perspectives including sample pretreatment and separation steps," *J. Environ. Radioact.*, vol. 244, 106812, 2022.
- [18] A. Finela, "Pengaruh penambahan HCl dan alum sebagai pH adjuster terhadap proses koagulasi dan parameter biologis pada pengolahan air limbah industri kertas," *Disertasi*, Institut Teknologi Sains Bandung, Indonesia, 2022.
- [19] N. Noviarty, E. Noerpitasari, R. Kriswarini, N. P. Qatrunnada, Y. Yanlinastuti, A. Jamaludin, A. Nugroho, "Determination of the optimal parameters for the separation of neodymium from cesium in U_3Si_2/Al fuel plate solution using precipitation method with $HClO_4$ " International Conference on Nuclear Science, Technology, and Applications, vol 2967, pp 170002-1–170002-10, 2024. <https://doi.org/10.1063/5.0194304>.
- [20] R. Wu, Y. Liu, S. Hu, P. Fu, dan Z. Xiao, "Red-emitting perovskite variant Cs_2PtCl_6 phosphor: Material design, luminous mechanism, and application in high-color-rendering white light-emitting diodes," *Adv. Opt. Mater.*, vol. 10, no. 21, 2201081, 2022, doi: 10.1002/adom.202201081.
- [21] A. Deschamps dan C. R. Hutchinson, "Precipitation kinetics in metallic alloys: Experiments and modeling," *Acta Mater.*, vol. 220, p. 117338, 2021.

Optimasi Pemisahan Sesium di Dalam Pelat Elemen Bakar Tipe U_3Si_2/Al Pasca Iradiasi
Menggunakan Metode Pengendapan Kloroplatinat
(Arif Nugroho, Komar Sutriah, Sri Mulijani, Triyono Basuki, Ahmad Ade Rofiqi, Noviarthy,
Helmi Fauzi Rahmatullah, Ganisa Kurniati Suryaman, Guswardani)

HALAMAN INI DIBIARKAN KOSONG