

KORELASI RADIOMETRI TERHADAP KANDUNGAN BESI PADA BIJIH URANIUM BM-179 KALAN-KALIMANTAN BARAT

Rachmat Sahputra dan M. Rif'at

Jurusan Kimia, FMIPA-Universitas Tanjungpura (UNTAN)

Jl. Ahmad Yani, Pontianak 78124

E-mail: rahmat_ui@yahoo.com

Diterima: 08 April 2015

Diperbaiki: 18 Mei 2015

Disetujui: 10 Juni 2015

ABSTRAK

KORELASI RADIOMETRI TERHADAP KANDUNGAN BESI PADA BIJIH URANIUM BM-179 KALAN-KALIMANTAN BARAT. Bijih uranium BM-179 Kalan Kalimantan Barat adalah bijih batuan dari Kalan, Kalimantan barat. Penelitian bertujuan mengetahui korelasi radiometri terhadap kandungan besi serta keterkaitannya dengan kandungan uranium. Metode untuk pemilihan sampel menggunakan ROS alat SPP-NF; pengayaan mineral menggunakan preparasi fisika flotasi. Penentuan kandungan besi menggunakan analisis dengan AAS Varian Spectr AA-20 ($\lambda=248,3$ nm) dan analisis kandungan uranium melalui spektrum uranyl-Br-PADAP ($\lambda=574$ nm). Hasil penelitian menunjukkan adanya korelasi linier antara radiometri dengan kandungan uranium mengikuti persamaan $y=3,5408x+1867,3$, dan penurunan kandungan besi terhadap peningkatan radiometri dengan persamaan $y=-1,351x+31261$. Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa bijih akan memiliki kandungan uranium tinggi dengan kandungan besi minimal dapat diperoleh dengan radiometri ≥ 6000 cps.

Kata kunci: Bijih uranium BM-179-Kalan-Kalimantan Barat, Korelasi, Radiometri, Besi

ABSTRACT

RADIOMETRIC CORRELATION OF IRON CONTENT AT BM-179 KALAN-WEST KALIMANTAN URANIUM ORE. BM-179 uranium ore is the ore rock from Kalan, West Kalimantan. The research aims to determine the radiometric correlation against the iron content and its relevance to the uranium content at BM-179 uranium ore of Kalan-West Kalimantan. Methods for the sample selection using tool ROS-NF SPP, enrichment of minerals using flotation physical preparation, determination of iron content using with AAS Varian Spectr AA-20 ($\lambda = 248.3$ nm) analysis and uranium content through spectral analysis of uranyl-Br-Padap ($\lambda = 574$ nm). Results of the study showed that there is a linear correlation between the radiometric of uranium content to follow the equation $y = 3.5408x + 1867.3$, an a decrease in iron content to increase of radiometric with the equation $y = -1.351x + 31261$. The results also showed that the ore will have a high uranium content with a minimum iron content can be obtained by radiometric ≥ 6000 cps.

Keywords: BM-179 Kalan-West Kalimantan uranium ore, Correlation, Radiometric, Iron

PENDAHULUAN

Kalan berada di Kecamatan Ela, Kabupaten Melawi, Provinsi Kalimantan Barat. Di daerah tersebut terdapat bukit Eko-Remaja. Pada bukit tersebut, BATAN telah berhasil membuat terowongan eksplorasi sepanjang 618 meter dan dalam kedalaman terowongan 179 meter terdapat bijih uranium BM-179. Untuk mencapai lokasi ini dapat ditempuh melalui udara maupun darat sejauh

± 500 km ke arah Timur dari Pontianak sampai Kota Nanga Pinoh, kemudian dilanjutkan dengan kendaraan darat sepanjang ± 70 km ke arah selatan.

Bijih uranium dari sektor Eko-Remaja-Kalan tersebut masih belum dimanfaatkan untuk berbagai keperluan penelitian dan pengembangan energi nuklir, padahal pada sektor ini memiliki cadangan uranium

yang cukup tinggi dengan cadangan sekitar lebih dari 12.409 ton U_3O_8 [1].

Cebakan uranium dalam bijih BM-179 Eko-Remaja-Kalan selain mengandung mineral Uranium (Uraninit, Branerit, Davindit dan Gummit) masih mengandung mineral asosiasi lain seperti pirit, pirholit, kalkoporit, kobaltit, lollingit, pentlandit, gerdorsfit, saflorit, sfalerit, molibdenit, ilmenit, magnetit dan klorit [2] dan unsur-unsur logam bernilai ekonomis. Kandungan uranium setiap daerah memiliki mineral yang berubah tergantung pada geologi, regolith, pengaturan geomorfik dan sejarah, hidrologi dan iklim wilayah pembentuknya, dan kandungan bijih dapat dihitung dengan mengintegrasikan analisis data uranium dan data geologinya [3]. Uraninit terjadi baik sebagai endapan di pyrobitumen atau berada terikat dalam pirit yang terjadi sebagai nanopartikel yang terjadi pada kondisi yang cukup terjadi oksidasi untuk pembentukan uranium secara hidrotermal [4].

Uranium selanjutnya dapat diperoleh dari bijih uranium BM-179 melalui proses leaching menggunakan asam sulfat, tetapi proses konvensional ini mengkonsumsi asam sulfat yang cukup banyak, tetapi ada alternatif lain selain menggunakan asam, yaitu menggunakan isolate mesophilic dari *Laptospirillum ferrooxidans* yang dapat menghasilkan 98% uranium pada 40°C [5-9]. Kandungan besi dalam bijih uranium dapat juga dilakukan dengan *bioleaching* seperti halnya uranium [10] dapat juga dilakukan dengan metode gravimetri, radiometri dan data magnetik [11].

Kandungan uranium dapat ditetapkan dengan berbagai alat analisis dengan berbagai metode radiometrik sinar radioaktif-*spectrometry* dengan spektrometri massa, induktif spektrometri massa plasma, akselerator spektrometri massa, termal ionisasi spektrometri massa, resonansi ionisasi spektrometri massa, ion sekunder spektrometri massa, dan spektrometri cahaya [12,13].

Penelitian yang berkaitan dengan karakteristik fisika kimia unsur-unsur transisi yang ada dalam bijih uranium BM-179 Kalan Kalimantan Barat belum banyak diketahui dan belum dipublikasikan. Sebagai originalitas dan kebaruan penelitian adalah dapat mengetahui korelasi radiometri terhadap kandungan besi serta keterkaitannya dengan kandungan uranium pada bijih uranium BM-179 Kalan Kalimantan Barat. Tujuan Penelitian ini adalah untuk mengetahui korelasi radiometri terhadap kandungan besi dan kandungan uranium pada bijih uranium BM-179.

Penemuan korelasi antar kandungan unsur-unsur yang ada dalam bijih uranium BM-179 Kalan Kalimantan Barat akan bermanfaat dan berguna untuk membantu pengambilan keputusan yang terkait dengan eksplorasi uranium di Kalan Kalimantan Barat serta mengefisiensikan semua tahapan kegiatan eksplorasi maupun eksploitasinya di waktu mendatang.

METODE PERCOBAAN

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan adalah contoh bijih Uranium BM-179-Eko-Remaja Kalan-Kalimantan Barat, gas oksigen, kertas lakmus, kertas saring whatman No.42, asam askorbat, trietanolamin, etil xantat 10 %, NKY-SNB, fine oil, kertas saring kasar, asbes, metil isobutil keton, HNO_3 pekat, asam sulfat pekat, TOPO, $Fe_2(SO_4)_3$, U_3O_8 dan H_2O_2 , amil xanthat, Na_2CO_3 , ZnO, $BaCl_2$ 10 %, KOH 2,5N, HNO_3 (6:1), HF pekat, kertas lakmus universal, alkohol, HNO_3 2,5 N, asam askorbat 5 %, NaF 2 %, Br-PADAP 0,05 %, $HClO_4$ pekat, HCl (1:1), standar unsur merk Titrisol (U, Fe), asetilene.

Peralatan yang digunakan adalah tanur, logam/pipa gelas/karet tahan panas, kondensor, termometer, oven, pH-meter, peralatan gelas (tabung reaksi, gelas ukur dan pipet erlenmeyer), cawan, pemanas, *grandsaw*, *jaw crusher*, *disk milk*, mortar *grinder*, ayakan-65 mesh, alat flotasi, cawan goach, cawan pijar, spektrometer dan AAS *Varian Spectr AA-20*.

Cara Kerja

Preparasi dengan flotasi: Sebanyak 500 gram bijih BM-179 ukuran 65 mesh, ditambah air menghasilkan *pulp* persen padat 30 %, dimasukkan dalam alat flotasi Wedag-Jerman menggunakan 1400 rpm. *Pulp* diaduk sambil pada pH 8 dengan natrium karbonat 10 %. Selanjutnya ditambah pereaksi *promother amil xanthat* sebanyak 0,15 mL dan *fronther pine oil* sebanyak 0,05 mL dan dibiarkan teraduk selama 5 menit. Konsentrat yang mengapung dipisahkan dengan hati-hati pada penampung. Waktu pemisahan dilakukan 10 menit. Selanjutnya konsentrat disaring, padatannya dipanaskan dalam oven dan ditimbang serta dilakukan analisis lebih lanjut.

Analisis besi menggunakan AAS: (1) Pembuatan Larutan standar: Larutan standar Fe dibuat dari standar unsur merk Titrisol. Standar Fe dilarutkan dalam 1000 mL labu ukur dengan *aquadest*. (2) Analisis besi: Dibuat deret larutan standat 0 ppm, 0,5 ppm, 1 ppm, 2 ppm dan 5 ppm besi dari larutan standar induk, diukur dengan AAS *Varian Spectr AA-20 Plus* menggunakan lampu Fe 56-100027-00 dengan seri No. JT574, *photomultiplier volts* 421,8 pada panjang gelombang 248,3 nm dan lebar celah 0,2 nm, *flute* udara-asetilen dengan asetilen *flow* sebesar 1,5 L/menit pada nyala oksidasi.

Analisis uranium menggunakan spektrofotometer: (1) *Pembuatan Larutan*, (a) Larutan TOPO 0,05 M. 19,28 gram TOPO dilarutkan dalam Sikloheksana, diencerkan menjadi 1 liter; (b) Larutan Asam askorbat 5 %; (c) Larutan kompleks I. 25 gram titriplex IV, 5 gram Na F dan 65 gram asam sulfosalisilat dilarutkan dalam 800 mL *aquadest* sambil diaduk. Ditambahkan larutan NaOH sedikit demi sedikit sampai pH 8,35,

kemudian larutan diencerkan menjadi 1000 mL dengan *aquadest*; (d) Larutan Komplek II. Satu bagian larutan kompleks I diencerkan dengan satu bagian *aquadest*, kemudian pH diatur menjadi 8,35 dengan 40 % NaOH; (e) Larutan *buffer* pH 8,35: sebanyak 149 gram (134,04 mL) trietanolamin dilarutkan dalam 800 mL *aquadest*. Dinetralkan dengan HClO₄ sampai pH 8,35 dan disimpan semalam. Hari berikutnya pH diatur kembali menjadi 8,35 dengan HClO₄, diencerkan menjadi 1 liter dengan *aquadest*; (f) Br-PADAP 0,05 %. 0,5 gram Br-PADAP dilarutkan dalam 1 liter alkohol. (2) *Analisis uranium*: Ditimbang 2 gram contoh bijih yang telah digerus halus, dimasukkan ke dalam beker teflon. Ditambahkan 30 mL HClO₄ + HNO₃ (6:1), dan HF pekat. Larutan dipanaskan perlahan-lahan di atas *hot plate* selama 1 jam sambil ditutup. Kemudian dikeringkan pada suhu 250 °C sampai terbentuk pasta. Pasta dilarutkan dengan HNO₃ 2,5 N, dimasukkan ke dalam labu ukur 50 mL; (g) Dipipet 1 mL larutan dimasukkan ke dalam labu kocok, ditambahkan 2 mL asam askorbat 5 %, 2 mL NaF 2 % dan 5 mL larutan TOPO 0,05 N. Campuran dikocok selama 2 menit, kemudian dibiarkan 5 menit sampai fasa organik terpisah dari fasa air dengan baik; (h) Dipipet 2 mL fasa organik, dimasukkan dalam labu ukur 25 mL, kemudian ditambahkan 1 mL larutan kompleks II, 1 ml larutan *buffer* pH 8,35, dan 2 ml Br-PADAP 0,05 %. Pada setiap penambahan pereaksi, larutan dikocok dengan baik. Setelah 10 menit, ditambahkan alkohol sehingga larutan tepat 25 mL. Spektrum uranil-Br-PADAP diukur dengan spektrofotometer pada panjang gelombang 574 nm. Dalam prosedur analisis ini dilakukan pula terhadap blangko yang dikerjakan mengikuti contoh.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Unsur-unsur yang dianalisis pada penelitian ini merupakan unsur potensial dari mineral mayor diantaranya: besi dan uranium. Data hasil analisis yang telah dilakukan dapat terlihat seperti Tabel 1.

Kandungan unsur besi pada bijih BM-179 Eko-Remaja merupakan unsur mayor yang potensial selain uranium. Hasil analisis unsur untuk radiometri terendah rata-rata 75 cps diperoleh kandungan sulfur 23452 ppm

Tabel 1. Data hasil radiometri dan kandungan unsur uranium, sulfur serta besi pada bijih BM-179 Kalan, Kalimantan Barat.

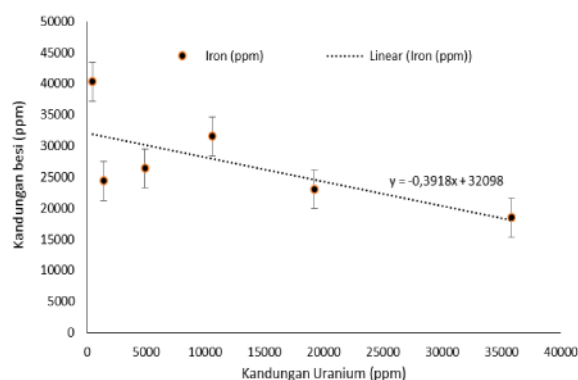
No	Titik Tengah Radiometri (cps)	Uranium (ppm)	Besi (ppm)
1	75	470	40309,6
2	225	1421	24374,6
3	750	4919	26413,7
4	2250	10595	31552,3
5	4000	19213	23055,7
6	10000	35842	18489,2

dan kandungan besi 40309,6 ppm sedangkan kandungan uraniumnya adalah 470 ppm, sedangkan untuk radiometri tertinggi rata-rata 10000 cps diperoleh kandungan besi sebesar 18489,2 ppm, sedangkan kandungan uranium diperoleh sebesar 35842 ppm.

Untuk memperoleh kandungan uranium yang lebih baik terdapat cara lain dalam tata kerjanya berdasarkan Penelitian lain dalam tahapan analisis dengan pelarutan dengan campuran larutan (HCl + HBF₄) ditambahkan larutan HF 40% berlebih, dan diaduk selama 60 menit tanpa pemanasan pada suhu 50 °C. Dalam penelitian tersebut disimpulkan untuk peroleh hasil yang lebih baik penggunaan larutan HF diminimalkan, atau mengganti dengan gas HF agar pengaruh H₂O sesedikit mungkin [13]. Jika analisis yang dilakukan menggunakan cara ini tentu dapat menghasilkan kadar uranium yang sedikit berbeda dengan data Tabel 1 di atas. Selain itu, hasil kandungan uranium dapat dioptimalkan sesuai penelitian G. Widodo pada saat penambahan *chelating agent* TOPO dengan menggunakan kondisi pH 4, dan waktu diperpanjang sampai beberapa jam [14]. Analisis untuk isotop uranium menggunakan Ionisasi electrospray ekstraktif (EESI) spektrometri massa (MS), telah digunakan untuk deteksi kuantitatif uranium dalam sampel larutan uranil nitrat, dengan kesalahan relatif pada kisaran 0,21% -0,25% dan proses analisis menjadi lebih cepat [15].

Penelitian ini ditampilkan dalam Tabel 1 di atas menunjukkan bahwa dalam bijih uranium BM-179 mengandung besi yang tinggi dan hal ini sejalan dengan sejalan dengan penelitian S. Tjokrokardono bahwa bijih uranium Eko-remaja mengandung mineral uraninit dan branerit, sulfida, besi dan titan oksida, fosfat dan silikat. Fe oksida dalam senyawa magnetit [1]. Selain itu bijih kalan banyak mineral asosiasi diantaranya mineral sulfida [16]. Mineral sulfida dalam bijih dapat dianalisis dengan pengembangan metode baru dalam bijih konsentrat (Yellow-Cake) dengan multi-kolektor induktif spektrometri massa plasma (MC-ICP-MS) dengan ketidakpastian antara 0,45 % dan 1,9 % [17].

Berkaitan korelasi antara radiometri dengan kandungan besi dan uranium pada Bijih uranium



Gambar 1. Grafik kandungan uranium terhadap kandungan besi dalam bijih uranium BM-179 Eko-Remaja Kalan Kalimantan Barat.

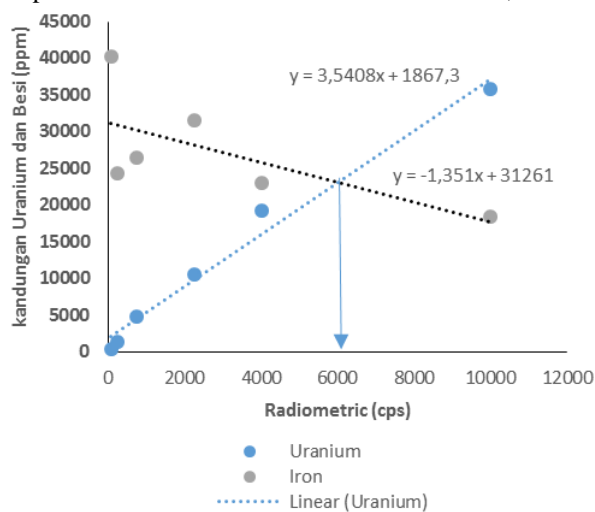
Eko-remaja Kalan Kalimantan Barat, belum dilakukan oleh peneliti sebelumnya.

Hasil penelitian yang disajikan pada Tabel 1 di atas juga menunjukkan hasil yang diperoleh dari penelitian bahwa semakin tinggi radiometri bijih BM-179 Kalan Kalimantan Barat, memiliki kandungan uranium semakin besar, sedangkan terhadap kandungan besi menunjukkan bahwa semakin tinggi radiometri bijih BM-179 mengandung besi semakin rendah.

Korelasi tersebut dapat disajikan dalam Gambar 1 dimana sumbu-X merupakan kandungan uranium dan sumbu-Y merupakan kandungan sulfur dan besi.

Gambar 1 menunjukkan bahwa pada batuan bijih uranium BM-179 Kalan Kalimantan Barat memiliki karakteristik bahwa dengan adanya kenaikan kandungan uranium, maka akan diikuti dengan penurunan kandungan sulfur dan besi dengan *trendline* garis linier mengikuti persamaan $y_1 = -0,3918x + 32098$, dimana y_1 adalah kandungan besi dan x adalah kandungan uranium dengan konstanta kandungan besi 32098 ppm.

Indikasi ini dapat memberikan hipotesis bahwa dalam bijih uranium BM-179 memiliki senyawa besi yang cukup tinggi. Terdapat banyak kemungkinan senyawa besi yang ada, selain bersenyawa dengan sulfur yang dapat membentuk pirit dan besi (II) sulfida, juga dapat membentuk oksida dalam bentuk hematit, limonit



Gambar 2. Grafik hubungan radiometri (cps) dengan kandungan uranium dan besi.

dan magnetit, atau membentuk senyawa karbonat seperti siderit, selain itu dapat membentuk senyawa silikat seperti taconit. Senyawa sulfur yang ada juga dapat bersenyawa dengan uranium membentuk uranil disulfida.

Hubungan radiometri dengan kandungan uranium, sulfur dan besi dapat disajikan seperti Gambar 2.

Gambar 2 menunjukkan bahwa kandungan uranium berbanding langsung dengan radiometri dengan persamaan $y = 3,5408x + 1867,3$, di mana y adalah kandungan uranium dan x adalah besar

radiometri, semakin tinggi radiometri memberikan informasi akan semakin tinggi kadar uranium. Kandungan besi mengikuti persamaan $y = -1,351x + 31261$ terhadap jumlah radiometri, artinya semakin tinggi radiometri memberi informasi semakin rendahnya kandungan besi.

Titik potong antara kandungan uranium dan besi ditunjukkan pada radiometri 6000 cps, sehingga untuk memperoleh kandungan uranium tinggi pada bijih BM-179 Kalan Kalimantan Barat dengan memperkecil besi terletak pada radiometri lebih besar atau sama dengan 6000 cps.

KESIMPULAN

Bijih uranium BM-179 Kalan Kalimantan Barat menunjukkan karakteristik batuan yang memiliki radiometri yang meningkat berbanding lurus dengan kadar uranium mengikuti persamaan $y = 3,5408x + 1867,3$, dimana y adalah kandungan uranium dan x adalah besar radiometri. Sebaliknya, kandungan besi berbanding terbalik terhadap radiometri dengan mengikuti persamaan $y = -1,351x + 31261$. Hasil penelitian juga menemukan bahwa kandungan uranium yang tinggi tetapi dengan kandungan besi rendah pada bijih BM-179 Kalan Kalimantan Barat akan dapat diperoleh pada radiometri lebih besar atau sama dengan 6000 cps.

UCAPAN TERIMAKASIH

Hasil penelitian ini dapat dicapai karena bantuan dari berbagai pihak antara lain: BATAN yang telah memberi bantuan tempat penelitian. UNTAN dan rekan-rekan sejawat serta mahasiswa seluruh civitas akademika.

DAFTAR ACUAN

- [1]. S. Tjokrokardono. "Prospek Pengembangan Cebakan Uranium di Kalan, Kalimantan", *Jurnal Nuklir Indonesia*, Himpunan Masyarakat Nuklir Indonesia, vol. 1 (1), pp. 1-12, 1998.
- [2]. A. E. Mc Cafferty, D. B. Stoesser, and B. S. V. Gosen. "Geophysical Interpretation of U, Th, and Rare Earth Element Mineralization of the Bokan Mountain Peralkaline Granite Complex, Prince of Wales Island, Southeast Alaska". *Interpretation*, vol. 2(4), 2014.
- [3]. K. Affandi. *Scientis Exchange Program 1992/1993: Pretreatment and Extraction of Uranium from Refractory Uranium Minerals*, Japan: PNC, Ningyo Toge Works, 1993.
- [4]. A. K. Chaturvedi, Cas Lotter, Shailesh Tripathi, A. K. Maurya, Indrajit Patra, P. S. Parihar. "Integrated application of heliborne and ground electromagnetic surveys for mapping EM

- conductor for uranium exploration and its subsurface validation, North Delhi Fold Belt, Rajasthan, India: A case study", *Geophysics*, Vol 78 (1), Jan. 2013.
- [5]. Anthony, W. John, Bideaux, *et al.* *Uraninite, Handbook of Mineralogy*, Mineralogical Society of America, Monte C. (ed.), ISBN 0-9622097-2-4, US: Chantilly, VA, 2011.
- [6]. Abhilash, B. D. Pandey and L. Ray. "Bioleaching of Apatite Rich Low Grade Indian Uranium Ore". *Canadian Metallurgical Quarterly*, vol. 51 (4), Apr. 2012.
- [7]. Abhilasha and B. D. Pandeya. "Microbially Assisted Leaching of Uranium-A Review". *Metallurgy Review: An International Journal*, vol. 34, pp. 81-113, 2013.
- [8]. A. Sciarra, A. Fascetti, A. Moretti, *et al.* "Geochemical and radiometric profiles through an active fault in the Sila Massif (Calabria, Italy)". *Journal of Geochemical Exploration*. vol. 148, pp. 128-137, Jan. 2015.
- [9]. Abhilash and B.D. Pandey. "Role of ferric ions in bioleaching of uranium from low tenor Indian ore". *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review: An International Journal*, vol. 50, pp. 102-112. Apr. 2011.
- [10]. T. R. H. Woolrych, A. N. Christensen, D. L. McGill, *et al.* *Geophysical Methods Used in the Discovery of the Kitumba Iron Oxide Copper Gold Deposit*. Mining and Minerals Exploration Interpretation, Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologists, Feb. 2015.
- [11]. I.M. Al-Alfy, M.A. Nabih, E.A. Eysa. "Gamma Ray Spectrometry Logs as a Hydrocarbon Indicator for Clastic Reservoir Rocks in Egypt". *Applied Radiation and Isotopes*, vol. 73, pp. 90-95. Mar. 2013.
- [12]. O.T. Butler, R.L.C. W. Cairns, J. M. Cook, *et al.* "2014 Atomic Spectrometry Update- A Review of Advances In Environmental Analysis". *Journal Anal. At. Spectrom.* 2015.
- [13]. A. Kadarjono, Sigit, J.P. Menra. "Pengaruh Asam Fluoroborat dalam Pelarutan Logam Uranium dan Pengendapan Hasil Pelarutannya". *Journal Teknik Bahan Nuklir*, vol. 6 (2), pp. 71 - 134, 2010.
- [14]. G. Widodo, K. T. Basuki. "Pengaruh pH Larutan Umpan, Waktu Kontak, dan Konsentrasi Eluan Pada Pemungutan Uranium oleh Resin Termodifikasi", *Journal Teknik Bahan Nuklir*. vol. 8(1), pp. 1-66, 2012.
- [15]. C. Liu, B. Hu, J. Shi, *et al.* "Determination of Uranium Isotopic Ratio ($^{235}\text{U}/^{238}\text{U}$) Using Extractive Electrospray Ionization Tandem Mass Spectrometry". *Journal Anal. At. Spectrom.*, vol. 26, pp. 2045-2051, 2011.
- [16]. S. Tjokrokardono. "Studi Provinsi Uranium Kalimantan: Kajian Mineralisasi Uranium pada Batuan Metamorf dan Granit di Pegunungan Schwaner". Dalam *Prosiding Seminar Iptek Nuklir dan Pengelolaan Sumber Daya Tambang PPBGN-BATAN*, 2002, pp. 66-77.
- [17]. S. Han, Z. Varga, J. Krajko, *et al.* "Measurement of the Sulphur Isotope Ratio ($^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$) in Uranium Ore Concentrates (Yellow Cakes) for Origin Assessment". *J. Anal. At. Spectrom.*, vol. 28, pp. 1919-1925, 2013.