

Mobilitas Uranium pada Endapan Sedimen Sungai Aktif di Daerah Mamuju, Sulawesi Barat

Uranium Mobility on Active Stream Sediment in Mamuju Area, West Sulawesi

Frida Rosidatul Mu'awanah^{1*}, Bambang Priadi², Widodo³, I Gde Sukadana³, Rian Andriansyah¹

¹Program Studi Eksplorasi Tambang, Institut Teknologi dan Sains Bandung (ITSB)

Jl. Ganesha Boulevard, Lot-A1 CBD Kota Deltamas, Cikarang Pusat, Kabupaten Bekasi, Indonesia 17530

²Program Studi Teknik Geologi, ITB, Jl. Ganesha No.10, Bandung, Indonesia 40132

³Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir – BATAN

Jl. Lebak Bulus Raya No.09 Pasar Jumat, Jakarta, Indonesia, 12440

Naskah diterima: 8 November 2018, direvisi: 25 November 2018, disetujui: 30 November 2018

DOI: [10.17146/eksplorium.2018.39.2.4953](https://doi.org/10.17146/eksplorium.2018.39.2.4953)

ABSTRAK

Mamuju merupakan daerah yang memiliki nilai laju dosis radiasi (radioaktifitas) tinggi. Daerah penelitian terdiri dari 6 sektor yaitu Sektor Ahu, Orobatu, Takandeang, Botteng, Pangasaan, dan Taan. Variasi batuan pada daerah penelitian tidak mencerminkan distribusi uranium, sehingga diperlukan metode geokimia untuk mengetahui distribusi uranium pada sistem drainase. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran mobilitas dan distribusi uranium pada sistem drainase dengan menggunakan sampel sedimen sungai aktif. Analisis mobilitas uranium menggunakan persen labil yang didapatkan dari perbandingan uranium total dan uranium labil. Nilai uranium total didapatkan dari pengukuran *X-Ray fluorescence spectrometry* dan nilai uranium labil didapatkan dari pengukuran *labile fluorimetry*. Pengambilan sampel dilakukan pada 4 lokasi potensial berdasarkan data radiometri. Hasil analisis menunjukkan Sektor Ahu memiliki nilai anomali uranium labil >113,44 ppm, Sektor Pangasaan dengan nilai anomali uranium labil >168,63 ppm, Sektor Takandeang dengan nilai anomali uranium labil >74,36 ppm, dan Sektor Botteng dengan nilai anomali uranium labil >84,23 ppm. Tipe anomali yang teridentifikasi pada dua sektor, yaitu anomali pada sektor Ahu berhubungan dengan presipitasi hidrolisat uranium terlarut pada endapan sungai dari lava Ahu dan breksi Tapalang, sementara anomali pada Sektor Takandeang berhubungan dengan pengayaan permukaan uranium in situ pada tanah dan batuan lava Takandeang.

Kata kunci: mobilitas uranium, endapan sedimen, geokimia, Mamuju.

ABSTRACT

Mamuju is an area that has a high dose rate (radioactivity) value. The research area consists of 6 sectors namely Ahu, Orobatu, Takandeang, Botteng, Pangasaan, and Taan Sector. Lithological distribution does not represent the distribution of uranium; therefore geochemical method is needed to observe the distribution of uranium in the drainage system. The aim of this research is to provide an overview of the mobility and distribution of uranium in the drainage system using stream sediment. Uranium mobility analysis uses labile percent obtained from the ratio of total uranium and labile uranium, the total uranium value obtained from the measurement of X-Ray fluorescence spectrometry and the value of labile uranium obtained from measurement of labile fluorimetry. The sample taken from 4 potential areas based on radiometric value Map. The result of analysis shows that Ahu Sector has labile uranium anomaly >113.44 ppm, Pangasaan Sector with labile uranium anomaly >168.63 ppm, Takandeang Sector with uranium labile anomaly values >74.36 ppm, and Botteng Sector with uranium labile anomaly >84.23 ppm. The anomaly types identified from two sectors, namely Ahu Sector anomaly is related to the precipitation of dissolved uranium hydrolysates in stream deposit originating from Ahu lava and Tapalang breccia, while Takandeang Sector anomaly is related to the enrichment of in situ uranium in soil and Takandeang lava.

Keywords: uranium mobility, stream sediment, geochemistry, Mamuju.

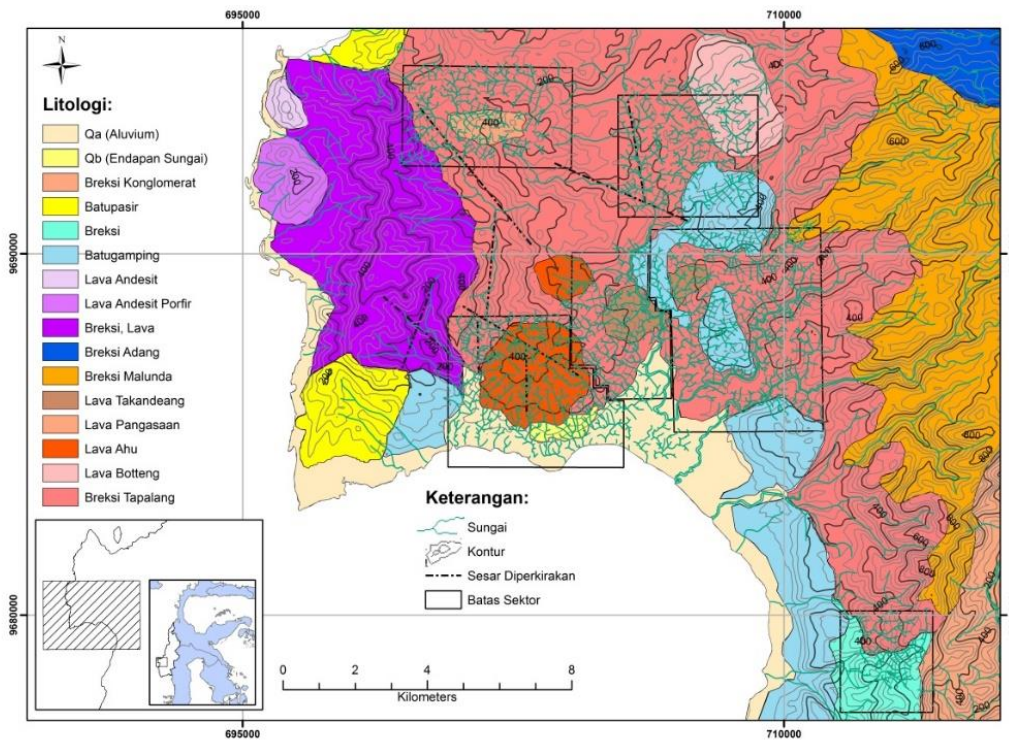
PENDAHULUAN

Beberapa daerah di Kabupaten Mamuju merupakan daerah yang memiliki nilai laju dosis radiasi (radioaktifitas) tinggi [1]. Nilai radioaktifitas yang tinggi pada batuan gunung api Adang diperkirakan berasal dari keterdapatannya kandungan mineral radioaktif alami [2], namun distribusi radioaktifitas permukaan pada daerah ini tidak merepresentasikan manifestasi uranium pada sistem drainase. Aplikasi geokimia dalam kegiatan eksplorasi memungkinkan untuk mencari daerah prospek cebakan uranium dari hancuran batuan yang tertransport secara mekanis dan kimia di sistem drainase alamiah daerah penelitian dengan menggunakan metode sampling sedimen sungai aktif. Hal tersebut dilakukan karena uranium bersifat mudah larut dan mudah terendapkan (*labile*) di lingkungan tertentu. Kajian sifat mobilitas unsur uranium di beberapa sektor daerah Mamuju, Sulawesi Barat dapat dilakukan dengan menganalisis kadar uranium total dan uranium labil. Uranium total merupakan kadar uranium keseluruhan yang ada pada sampel, sedangkan uranium labil adalah kadar uranium yang melapisi butiran yang bersifat primer atau sekunder dan larut dalam asam nitrat [3].

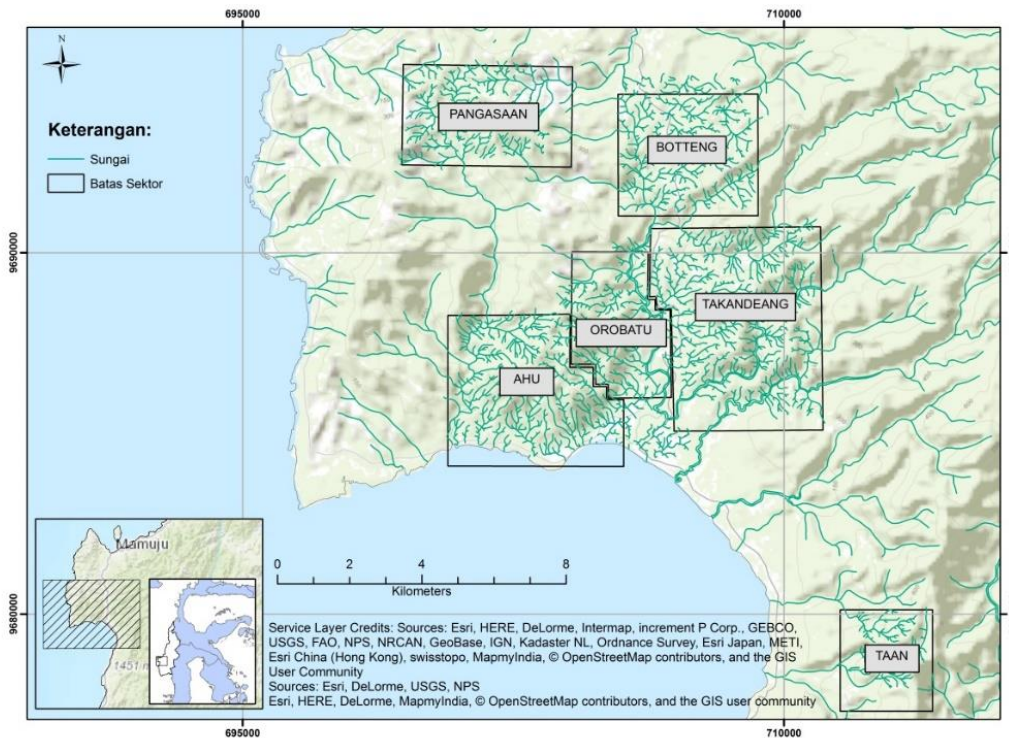
Berdasarkan peta geologi daerah Mamuju (Gambar 1), daerah penelitian secara umum tersusun oleh kelompok batuan gunung api dan batuan sedimen muda [2]. Batuan gunung api di daerah penelitian memiliki variasi yang beragam baik dari jenis maupun komposisi. Berdasarkan data geologi regional, sebagian besar batuan gunung api yang terdapat di daerah penelitian adalah kelompok batuan gunung api Adang kompleks Tapalang berupa lava dan breksi vulkanik. Batuan sedimen muda didominasi oleh produk klastika

gunung api dan batuan karbonat. Satuan tertua adalah satuan batugamping kristalin yang diperkirakan memiliki umur hampir sama dengan batuan gunung api. Sedimen yang lebih muda adalah batuan konglomerat gunung api yang terbentuk dari hasil rombakan atau longsor batuan gunung api yang bersifat *grain supported*. Selanjutnya dalam satuan batugamping terumbu yang mudah dijumpai di daerah dekat pantai. Batuan yang tersingkap dengan elevasi yang cukup tinggi merupakan penciri terjadinya pengangkatan. Satuan selanjutnya merupakan endapan sedimen muda yang belum mengalami litifikasi yaitu endapan aluvium berupa konglomerat yang tersebar terbatas pada daerah teras pantai dataran Tapalang.

Tujuan penelitian ini adalah mempelajari mobilitas uranium di daerah penelitian yang selanjutnya digunakan untuk menentukan daerah yang berpotensi besar memiliki cebakan uranium di beberapa sektor daerah Mamuju, Sulawesi Barat, sehingga dapat menjadi saran dan acuan dalam eksplorasi lanjutan. Lokasi pengambilan sampel berada di beberapa sektor potensial yang dibatasi oleh koordinat 698156 mT – 716054 mT dan 9677339 mU – 9696136 mU dengan luas $\pm 336,429 \text{ km}^2$ (Gambar 2). Secara administratif, daerah penelitian mencakup wilayah 3 kecamatan, yaitu Tapalang, Tapalang Barat, dan Simboro. Anomali berdasarkan sampel sedimen sungai aktif akan jelas tergambar pada daerah yang teridentifikasi mengalami pengayaan permukaan unsur radioaktif yakni proses pelapukan, pencucian dan pengendapan uranium. Beberapa tempat yang merupakan sektor potensial mengandung mineral radioaktif tersebut memiliki posisi vulkanostratigrafi yang berbeda-beda [4].



Gambar 1. Peta geologi daerah penelitian [2].



Gambar 2. Pola pengaliran (drainase) di lokasi penelitian (batas kotak).

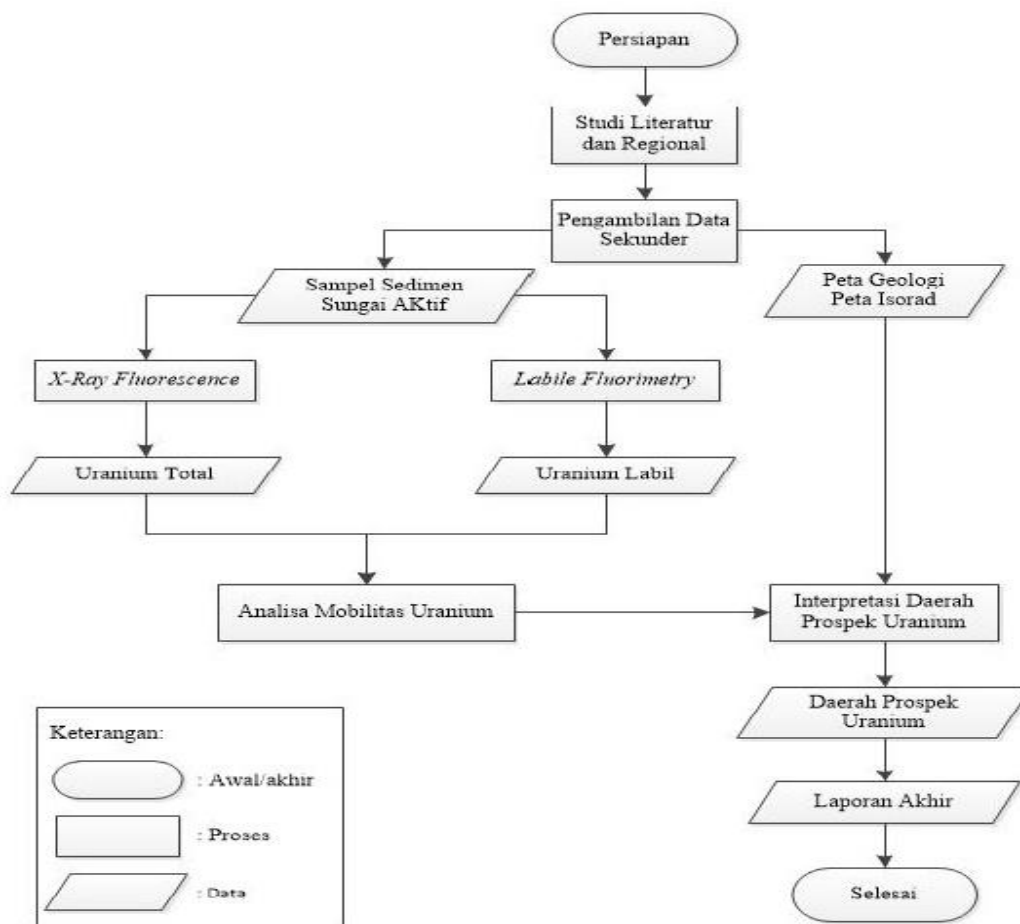
METODOLOGI

Penelitian diawali dengan kajian pustaka untuk mengkaji mobilitas uranium terutama pada lingkungan geologi permukaan

berdasarkan sifat kelabilan uranium serta mengkaji dasar-dasar mengenai prospeksi unsur radioaktif berdasarkan data sedimen sungai aktif [5]. Selanjutnya dilakukan

kegiatan lapangan, yaitu pengambilan sampel sedimen sungai aktif yang selanjutnya dianalisis untuk mengetahui kadar uranium dengan menggunakan metode *X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF)* dan *Labile Fluorimetry (LF)* [6]. Selanjutnya data

tersebut digunakan untuk menganalisis mobilitas uranium pada kegiatan prospeksi selanjutnya. Alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Diagram alir penelitian.

X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF)

Pengukuran kadar dengan metode *X-Ray fluorescence spectrometry* dilakukan untuk menentukan kadar uranium total. Terdapat 30 sampel yang mewakili keseluruhan sektor yang dianalisis menggunakan XRF. Sampel sebanyak 5 gram dicampurkan dengan *fluxana binders* sebanyak 1 gram hingga benar-benar tercampur merata, lalu campuran sampel dan *fluxana binders* ditekan dengan menggunakan manual *hydraulic press* hingga terbentuk tablet atau *pressed pellets* siap

ukur. Tablet kemudian dimasukkan ke dalam tempat sampel pada alat spektrometer XRF dan alat akan membaca kadar setiap unsur dari sampel-sampel tersebut.

Labile Fluorimetry

Sampel yang dilakukan analisis *labile fluorimetry* sebanyak 226 titik sampel yang tersebar di semua sektor, analisis *labile fluorimetry* dilakukan untuk mendapatkan data kadar uranium labil. Satu gram sampel dimasukkan ke dalam tabung ditambah 25 ml

HNO₃ 4 N, lalu dikocok dan dipanaskan dalam *water bath* dengan suhu 95° C selama 2 jam, lalu diangkat dan dibiarkan selama 1 malam sampai cairan terpisah dari endapannya. Tabung reaksi yang masing-masing berisi larutan sampel dan larutan standar ditambahkan 1 ml Asam Askorbat, 1 ml Natrium Fluorida, dan 2 ml TOPO, lalu dikocok selama 2 jam dengan mesin kocok (*vortex mixer*) dan didiamkan selama 30 menit sampai fasa organik terpisah. Sebanyak 400 µl larutan organik dipipet ke dalam cawan platina dan dipanaskan pada *hot plate* hingga kering. Cawan platina diisi dengan 0,3 g *flux*, lalu dilebur dalam *furnace* 650° C selama 10 menit. Hasil peleburan kemudian didinginkan di dalam desikator. Intensitas fluoresensi sampel dan standar diukur dengan alat *fluorometer*. Konsentrasi uranium dihitung dengan menggunakan kurva kalibrasi berdasarkan perbandingan besaran intensitas fluoresensi sampel dan standar dengan persamaan linier.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini dilakukan analisis terhadap 226 sampel yang berasal dari 6 sektor potensial. Peta lokasi pengambilan sampel dan sebaran hasil analisis uranium *mobile* terdapat pada Gambar 5.

Mobilitas Uranium

Mobilitas uranium adalah kemampuan berpindahnya uranium dari lingkungan asal ke lingkungan yang baru baik secara fisik atau kimia. Mobilitas uranium pada endapan sungai aktif sangat bergantung pada kondisi reduksi dan oksidasi suatu daerah. Kadar uranium labil yang didapatkan pada endapan sungai aktif, sangat bergantung pada kandungan uranium pada batuan sumbernya [3]. Penelitian ini difokuskan pada mobilitas

uranium yang dikaji berdasarkan data permukaan meliputi kadar uranium total dan kadar uranium labil yang berasal dari sampel sedimen sungai aktif. Uranium total merupakan kadar keseluruhan yang ada pada butir sampel sedimen, sedangkan uranium labil adalah banyaknya uranium yang melapisi butiran (*coating uranyl*) yang berasal dari butir sedimen itu sendiri (*primer*) maupun berasal dari adsorpsi (UO₂)²⁺ oleh mineral lempung, oksida besi, dan material organik (*sekunder*) [7].

Variasi mobilitas uranium pada daerah penelitian bernilai sedang hingga tinggi dengan persen labil sekitar 50-100% (Gambar 4). Lebih dari setengah uranium yang ada pada sampel bersifat labil yang berasal dari uranium primer (*insitu* pada butir) yang mengalami oksidasi atau uranium yang sekunder yang teradsorpsi dan terpresipitasi pada sampel [6]. Dari keseluruhan lokasi pengambilan sampel, Sektor Ahu merupakan daerah yang memiliki mobilitas uranium tinggi terutama pada sungai di bagian selatan Ahu.

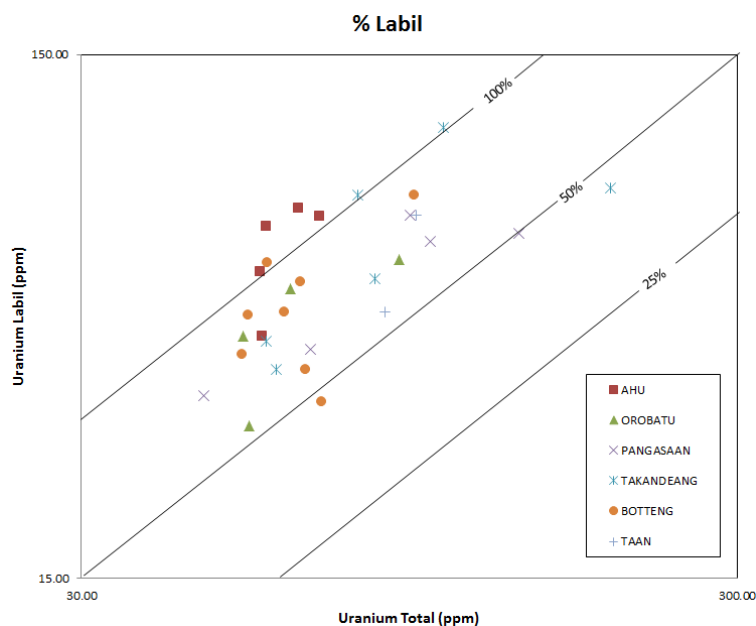
Sebaran Uranium

Hasil pengolahan data dalam penentuan nilai ambang uranium telah digambarkan dalam bentuk peta anomali uranium dari sampel sedimen sungai aktif, laju dosis radiasi, dan radioelemen uranium permukaan. Sebaran uranium di daerah penelitian berhubungan dengan litologi, pengaruh pelapukan, pencucian dan pengayaan di permukaan. Kelarutan uranium pada air terpengaruh oleh jenis mineral yang mengandung uranium. Ikatan kimia mineral merupakan faktor lain dalam pelepasan uranium suatu mineral [8].

Nilai konsentrasi uranium di Sektor Ahu berkisar antara 24,72–156,55 ppm dengan

nilai rata-rata 61,90 ppm. Sebaran uranium dapat dibagi menjadi 2 populasi yaitu anomali ($>113,44$ ppm) dan latar belakang ($\leq 113,44$ ppm). Penyebaran populasi anomali didukung dengan adanya anomali berdasarkan kadar uranium permukaan (*radioelement*) dan laju dosis radiasi. Anomali berhubungan dengan

uranium yang tertransport dari lapukan breksi Tapalang dan lava Ahu[4] (*source rock*) yang terendapkan pada endapan sungai (*depositional site*) sebagai hidrolisat pengendapan uranium terlarut.



Gambar 4. Perbandingan uranium total dan uranium labil.

Untuk Sektor Orobatu, Nilai konsentrasi uranium berkisar 15,96–81,67 ppm dengan nilai rata-rata 48,80 ppm. Sebaran uranium dapat dibagi menjadi 2 populasi yaitu anomali ($>75,94$ ppm) dan latar belakang ($\leq 75,94$ ppm). Penyebaran populasi anomali didukung dengan adanya anomali berdasarkan kadar uranium permukaan (*radioelement*) dan laju dosis radiasi. Anomali berhubungan dengan pelapukan breksi Tapalang.

Di Sektor Takandeang, nilai konsentrasi uranium berkisar antara 5,18–138,94 ppm dengan nilai rata-rata 37,62 ppm. Sebaran uranium dapat dibagi menjadi 2 populasi yaitu anomali ($>74,36$ ppm) dan latar belakang ($\leq 74,36$ ppm). Penyebaran populasi anomali didukung dengan adanya anomali berdasarkan kadar uranium permukaan

(*radioelement*) dan laju dosis radiasi. Anomali berhubungan dengan pelapukan lava Takandeang sebagai hidrolisat *in situ* pada batuan dan tanah dicirikan dengan adanya pengayaan permukaan pada penelitian sebelumnya [7].

Pada Sektor Ahu-Orobatu-Takandeang, nilai rata-rata konsentrasi uranium sebesar 48,16 ppm. Sebaran uranium dapat dibagi menjadi 2 populasi yaitu anomali ($>100,45$ ppm) dan latar belakang ($\leq 100,45$ ppm). Penyebaran populasi anomali didukung dengan adanya anomali berdasarkan kadar uranium permukaan (*radioelement*) dan laju dosis radiasi. Anomali berada pada dua sektor yaitu Ahu dan Takandeang. Anomali di Sektor Ahu berhubungan dengan uranium yang tertransport dari lapukan breksi

Tapalang dan lava Ahu (*source rock*) terendapkan pada endapan sungai (*depositional site*). Sedangkan pada sektor Takandeang, anomali berhubungan dengan pelapukan lava Takandeang dan tertransport tidak terlalu jauh karena mobilitas tidak terlalu tinggi pada sektor ini.

Sektor Pangasaan yang berada di bagian utara nilai konsentrasi uranium berkisar antara 18,70–226,67 ppm dengan nilai rata-rata 85,18 ppm. Sebaran uranium dapat dibagi menjadi 2 populasi yaitu anomali ($>168,63$ ppm) dan latar belakang ($\leq 168,63$ ppm). Penyebaran populasi anomali didukung dengan adanya anomali berdasarkan kadar uranium permukaan (*radioelement*) dan laju dosis radiasi. Anomali berhubungan dengan pelapukan breksi Tapalang.

Sektor Botteng yang berada di bagian timur nilai konsentrasi uraniumnya berkisar antara 28,36–112,83 ppm dengan nilai rata-rata 56,62 ppm. Sebaran uranium dapat dibagi menjadi 2 populasi yaitu anomali ($>84,23$ ppm) dan latar belakang ($\leq 84,23$ ppm). Penyebaran populasi anomali didukung dengan adanya anomali berdasarkan kadar uranium permukaan (*radioelement*) dan laju dosis radiasi. Anomali berada di sungai dan tidak berhubungan langsung dengan keberadaan sesar. Anomali berhubungan dengan pelapukan breksi Tapalang.

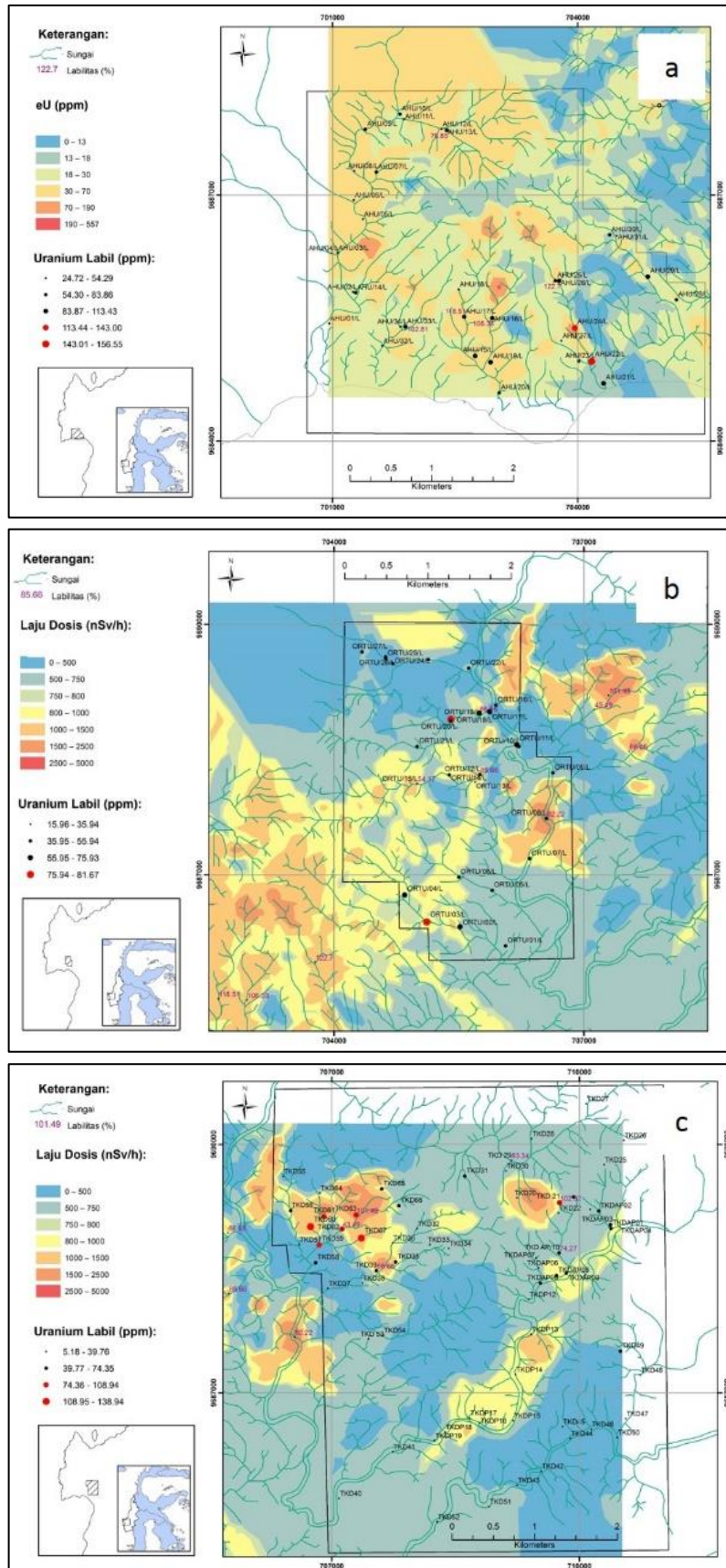
Sementara itu, Sektor Taan yang berada di paling selatan, nilai konsentrasi uranium berkisar antara 26,79–78,20 ppm dengan nilai rata-rata 43,21 ppm. Sebaran uranium dapat dibagi menjadi 2 populasi yaitu anomali ($>75,82$ ppm) dan latar belakang ($\leq 75,82$ ppm). Penyebaran populasi anomali didukung dengan adanya anomali berdasarkan kadar uranium permukaan (*radioelement*) dan laju dosis radiasi. Anomali berhubungan dengan pelapukan breksi Tapalang.

Daerah Prospek Uranium

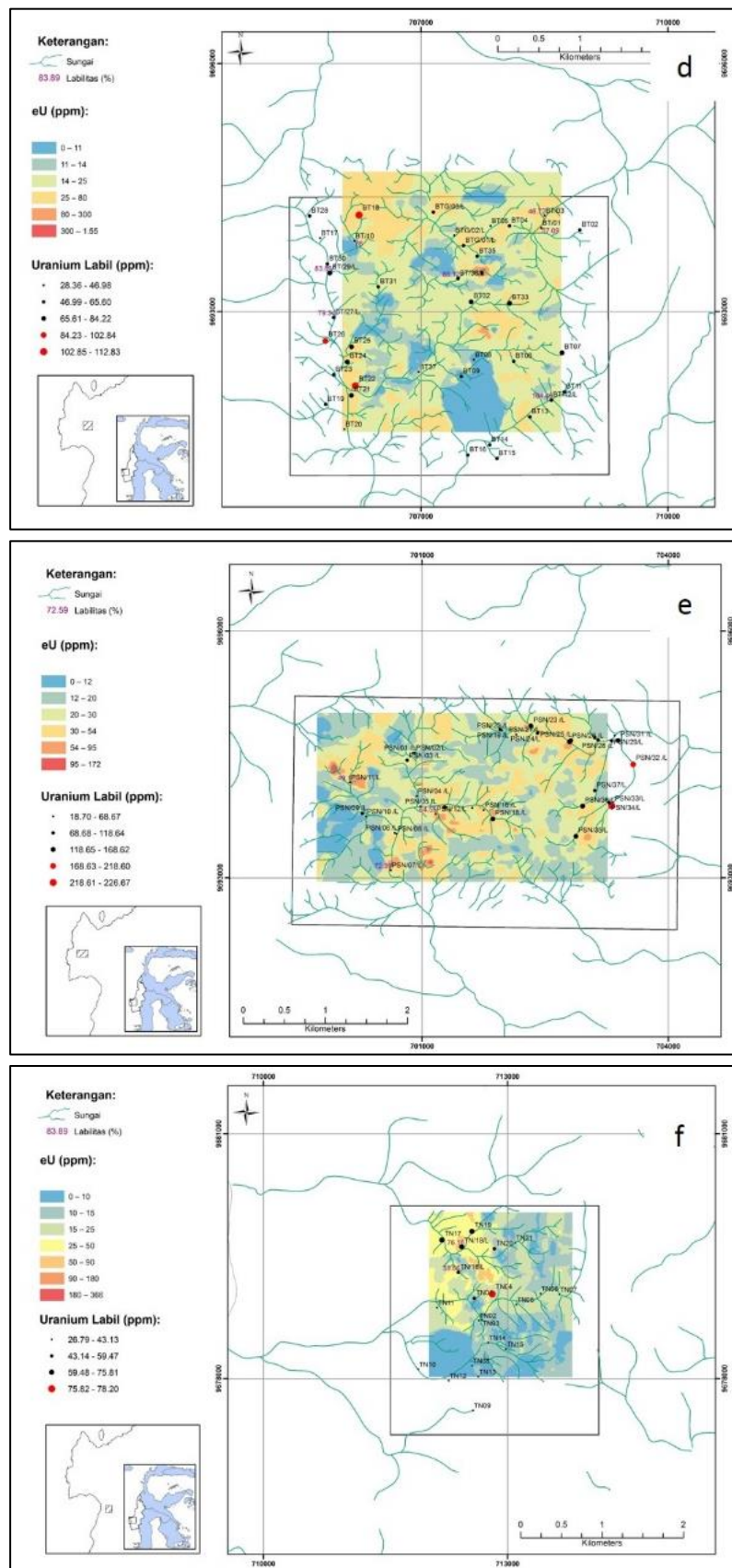
Daerah prospek dianalisis berdasarkan sebaran anomali uranium dari sampel sedimen sungai aktif dan peta radioelemen uranium dari pengukuran radioaktifitas batuan. Penentuan daerah prospek dilakukan dengan cara merunut dari lokasi sampel yang memiliki anomali uranium ke arah relatif hulu sungai. Pembagian daerah prospek berdasarkan urutan prioritas. Prioritas daerah prospek ditentukan berdasarkan faktor konsentrasi kadar ekivalen uranium total (eU ppm), kadar uranium labil, dan mobilitas uranium seperti pada Gambar 5.

Hasil pemetaan geokimia menunjukkan sebaran daerah yang mengandung mineral radioaktif yang ditunjukkan dengan sebaran radioaktifitas batuan yang cukup tinggi dan keterdapatan anomali radiometri [9]. Sifat kimia yang mengontrol kelarutan dan penyerapan uranium meliputi: pH, potensial redoks (Eh), karbonat terlarut, fosfat, dan material organik terlarut. Sifat kimia air merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap pelepasan uranium dari mineral kedalam air [10]. Jenis mineral yang mengalami pelapukan dan oksidasi akan melepaskan uranium bervalensi +6 (U(VI)) terlebih dahulu ke dalam air. Sedangkan uranium dengan valensi +4 (U(IV)) akan cenderung terikat pada mineral [11]. Daerah-daerah prospek di daerah penelitian tertera pada Tabel 1.

Berdasarkan sebaran nilai anomali uranium labil dan sebaran nilai radioaktifitas batuan di daerah penelitian menunjukkan korelasi yang sangat baik terdapat di Sektor Ahu dan Sektor Botteng. Hal ini menunjukkan bahwa pelepasan uranium labil terjadi pada daerah tersebut, sehingga dapat menjadi indikator daerah yang dapat menjadi fokus eksplorasi uranium [12].



Gambar 5. Peta distribusi ekuivalen uranium (eU) dan anomali kadar uranium labil di daerah potensial: a) Sektor Ahu, b) Sektor Orobatu, c) Sektor Takandeang.



Gambar 6. Peta distribusi ekuivalen uranium (eU) dan anomali kadar uranium labil di daerah potensial: d) Sektor Botteng, e) Sektor Pengasaandan f) Sektor Taan.

Tabel 1. Daerah-daerah potensial mineral radioaktif.

Daerah Prospek	Sektor	Tipe Anomali	Batuan Sumber
A	Ahu	Presipitasi pada Endapan Sungai	Lava Ahu, Breksi Tapalang
B	Pangasaan	-	Breksi Tapalang
C	Takandeang	Pengayaan Permukaan	Lava Takandeang
D	Botteng	-	Breksi Tapalang

KESIMPULAN

Berdasarkan perbandingan uranium total dan uranium labil dapat disimpulkan bahwa sektor Ahu memiliki persentase uranium labil dan mobilitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan sektor lainnya. Pada kegiatan prospeksi uranium, sebagian besar uranium berasal dari lapukan breksi Tapalang yang bersifat lebih *favourable* dan merupakan satuan batuan tertua pada daerah penelitian. Anomali yang berasal dari breksi Tapalang memiliki mobilitas lebih tinggi dibandingkan dari lava. Nilai anomali anomali uranium di beberapa sektor berdasarkan metode simpangan baku adalah sebagai berikut: Sektor Ahu >113,44 ppm, sektor Orobatu >75,94 ppm, Sektor Pangasaan >168,63 ppm, Sektor Takandeang >74,36 ppm, Sektor Botteng dan Sektor Taan > 84,23 ppm.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih penulis haturkan kepada Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir – BATAN atas kesempatan yang telah diberikan untuk melakukan penelitian di daerah Mamuju, Sulawesi Barat.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Syaeful, I. G. Sukadana, and A. Sumaryanto, "Radiometric Mapping for Naturally Occurring Radioactive Materials (NORM) Assessment in Mamuju, West Sulawesi," *Atom Indones.*, vol. 40, no. 1, p. 35, May 2014.
- [2] I. G. Sukadana, A. Harijoko, and L. D. Setidjadji, "Tataan Tektonika Batuan Gunung Api Di Komplek Adang, Kabupaten Mamuju, Propinsi Sulawesi Barat," 2015.
- [3] International Atomic Energy Agency (IAEA), "Geochemical Exploration for Uranium," Vienna, 1988.
- [4] F. D. Indrastomo, I. G. Sukadana, A. Saepuloh, A. H. Harsolumakso, and D. Kamajati, "Interpretasi Vulkanostratigrafi Daerah Mamuju Berdasarkan Analisis Citra Landsat-8," *Eksplorium Buletin Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir*, vol. 36, no. 2, 29-Mar-2016.
- [5] J. Wang, J. Liu, H. Li, Y. Chen, T. Xiao, G. Song, D. Chen, and C. Wang, "Uranium and thorium leachability in contaminated stream sediments from a uranium minesite," *J. Geochemical Explor.*, vol. 176, pp. 85–90, 2017.
- [6] W. R. O. Jakob, G. C. Murphy, and M. C. B. Smit, *Comparison Of Total And Cold-Extractable Uranium In Stream Sediments Of The Southwestern Karoo Supergroup , South Africa*, no. January. Palindaba, Pretoria: Atomic Energy Board, South Africa, 1979.
- [7] K. F. Smith, N. D. Bryan, A. N. Swinburne, P. Bots, S. Shaw, L. S. Natrajan, J. F. W. Mosselmans, F. R. Livens, and K. Morris, "U(VI) behaviour in hyperalkaline calcite systems," *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 148, pp. 343–359, 2015.
- [8] R. M. Hazen, R. C. Ewing, and D. A. Sverjensky, "Evolution of uranium and thorium minerals," *Am. Mineral.*, vol. 94, no. 10, pp. 1293–1311, 2009.
- [9] F. D. Indrastomo, I. G. Sukadana, A. Saepuloh, and A. H. H., "Integrated Radiometric Mapping using Field Based and Remote Sensing Techniques for Uranium and Thorium Exploration at Mamuju Region , West Sulawesi , Indonesia," no. October, 2015.
- [10] M. S. Alam and T. Cheng, "Uranium release from sediment to groundwater: Influence of water chemistry and insights into release mechanisms," *J. Contam. Hydrol.*, vol. 164, pp. 72–87, 2014.
- [11] S. A. Cumberland, G. Douglas, K. Grice, and J. W. Moreau, "Uranium mobility in organic matter-rich sediments: A review of geological and geochemical processes," *Earth-Science Rev.*, vol. 159, pp. 160–185, 2016.
- [12] G. Cinelli, F. Tondeur, B. Dehandschutter, P. Bossew, T. Tollefsen, and M. De Cort, "Mapping uranium concentration in soil: Belgian experience towards a European map," *J. Environ. Radioact.*, vol. 166, pp. 220–234, 2017.