

EVALUASI SISTEM PENGENDAPAN URANIUM PADA BATUAN SEDIMEN FORMASI SIBOLGA, TAPANULI TENGAH

EVALUATION OF URANIUM DEPOSITIONAL SYSTEM IN SEDIMENTARY ROCKS OF SIBOLGA FORMATION, TAPANULI TENGAH

I Gde Sukadana* dan Heri Syaeful

Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional
Jl. Lebak Bulus Raya No. 09 Ps. Jumat, Jakarta 12440

*E-mail: sukadana@batan.go.id

Naskah diterima: 28 Oktober 2016, direvisi: 21 November 2016, disetujui: 26 November 2016

ABSTRAK

Uranium di alam dapat terbentuk dalam berbagai tipe cebakan, sesuai dengan sumber, proses, dan lingkungan pengendapannya. Keterdapatannya uranium di Sibolga pada batuan sedimen Formasi Sibolga merupakan suatu potensi yang layak untuk dikembangkan tetapi hingga saat ini belum diketahui pola pengendapan dan proses mineralisasi uranium tersebut. Penelitian bertujuan untuk mengetahui pola sebaran batuan dan keterdapatannya anomali kadar uranium berdasarkan data geologi, radiometri permukaan, dan data log bor untuk mengetahui proses pengendapan batuan dan mineralisasi uranium. Keterdapatannya mineralisasi berdasarkan data log bor tersebar dari satuan konglomerat alas (Kgl 1), satuan batupasir 1 (Bp 1), satuan konglomerat 2 (Kgl 2), dan satuan batupasir 2 (Bp 2) dengan ketebalan dan sebaran semakin ke atas semakin menipis. Sebaran mineralisasi pada bagian timur pada satuan batuan konglomerat 1 lebih didominasi oleh mineral detrital hasil pengendapan epigenetik berupa monasit yang terbentuk pada saat pembentukan granit sebagai batuan sumber. Pada satuan batuan di atasnya mineralisasi berbentuk pola alur (*channel*) yang berarah timur laut-barat daya, yang terbentuk secara *syn-genetic* dengan mineral berupa *uraninite*, *carnotite*, dan *coffinite*. Pengendapan batuan Formasi Sibolga berasal dari timur ke arah barat dan pengendapan uranium terjadi akibat perbedaan kondisi lingkungan pengendapan dari oksidasi di bagian timur menjadi lebih reduktif di bagian barat daya. Peningkatan kandungan material organik yang cukup tinggi pada lingkungan pengendapan bagian barat daya menyebabkan lingkungan pengendapan dalam kondisi reduksi.

Kata kunci: sedimen, uranium, mineralisasi, granit, Sibolga.

ABSTRACT

Uranium in nature formed in various deposit type, depends on its sources, process, and depositional environments. Uranium occurrence in Sibolga, hosted in sedimentary rocks of Sibolga Formation, is properly potential to develop; nevertheless, the depositional pattern and uranium mineralization process so far had not been recognized. The research aim is to determine the rock distribution patterns and the existence of uranium grade anomalies based on surface geology and borehole log data. Mineralization occurrences from borehole log data distributed from basalt conglomerate unit (Kgl 1), sandstone 1 unit (Bp 1), conglomerate 2 unit (Kgl 2), and sandstone 2 unit (Bp 2) with their distribution and thickness are thinning to the top. Mineralization distribution in the eastern area, mainly on Kgl 1 unit, dominated by detritus materials from epi-genetic depositional in the form of monazite which is formed along with the formation of granite as its source rock. Meanwhile, mineralization on the upper rocks units formed a channel pattern trending northeast-southwest, which formed in syn-genetic process consist of uraninite, carnotite, and coffinite. Sibolga Formation deposition originated from east to west and uranium deposit formed because of the differences of depositional environment from oxidation in the east to the more reductive in the southwest. The increasing of organic materials in southwest basin caused the reduction condition of depositional environment.

Keywords: sediment, uranium, mineralization, granite, Sibolga.

PENDAHULUAN

Keterdapatannya uranium di suatu daerah merupakan suatu potensi yang sangat strategis karena merupakan bahan baku pembuatan bahan bakar nuklir. Berbagai tipe cebakan telah dijumpai di berbagai belahan dunia yang didominasi oleh tipe cebakan ketidakselarasan (*unconformity*), batupasir (*sandstones*), kompleks breksi (*breccia complexes*), granit, tipe gunung api (*volcanic related*), serpih hitam (*blackshale*), dan tipe cebakan lainnya [1]. Formasi Sibolga yang tersusun oleh batupasir merupakan salah satu formasi yang mengandung kadar uranium cukup signifikan [2]. Mobilisasi dan pengendapan uranium pada batuan sedimen dipengaruhi oleh dua hal yang dominan, yaitu (1) kondisi geologi global dipengaruhi oleh kandungan material organik yang sangat bervariasi pada batuan sedimen sehingga dapat menyebabkan terjadinya perubahan Eh-pH, (2) keterdapatannya material organik pada batuan sedimen dapat menyebabkan terjadinya perubahan valensi pada uranium sehingga uranium valensi 6 (U(VI)) dapat berubah menjadi uranium valensi 4 (U(IV)) [3]. Mobilisasi uranium dapat terjadi akibat proses hidrotermal dan proses oksidasi oleh air tanah. Karena perbedaan tingkat kelarutan antara kondisi uranium teroksidasi dan kondisi tereduksi, maka kondisi reduksi sangat efektif dalam penyerapan uranium dan pembentukan mineral hasil reduksi dengan uranium terlarut dalam larutan oksidasi [4]. Mineralisasi uranium di Sektor Aloban Sibolga merupakan tipe batupasir tabular epigenetik (*epigenetic tabular sandstone type*) yang diendapkan pada zona reduksi-oksidasi (*redox*) dengan jenis mineral *uraninite*, *carnotite*, dan *coffinite* yang merupakan mineralisasi permukaan [5].

Keterdapatannya uranium pada bagian dekat dengan permukaan sangat sering terbentuk,

kajian geofisika juga telah dilaksanakan. Hingga saat ini belum diketahui pola sebaran mineralisasi secara detail serta proses pengendapan belum diketahui. Untuk mengetahui pola penyebaran, bentuk, serta proses pengendapan uranium di Sibolga maka dilakukan evaluasi terhadap seluruh data bor yang pernah dilakukan di Aek Siti dan Harirongga. Dengan evaluasi ini diharapkan dapat memperlihatkan sebaran uranium dan proses pengendapannya.

METODOLOGI

Data yang digunakan dalam pengamatan mineralisasi uranium adalah data geologi permukaan, radiometri, dan log bor. Data radiometri merupakan suatu data khusus dalam eksplorasi uranium atau mineral lain yang mengandung unsur radioaktif. Pada prinsipnya segala sesuatu yang bersifat radioaktif, termasuk batuan yang mengandung uranium atau thorium memancarkan radiasi yang hanya dapat ditangkap oleh detektor. Alat yang digunakan dalam pengambilan data radiometri di lokasi penelitian adalah:

- SPP2NF. Prinsip pengukuran radiometri dengan alat SPP2NF adalah dengan memperkirakan kadar uranium pada batuan dengan mencacah seluruh sinar gamma yang tertangkap oleh detektor NaITl. Satuan yang digunakan dalam pengukuran ini adalah cps (*count per second*). Namun dikarenakan cacahan sinar gamma dapat berasal dari uranium, thorium, dan potasium maka biasanya kadar uranium hasil pengukuran dengan metoda ini dilambangkan dengan rU (*relative uranium*).
- Exploranium GR-320, dilakukan untuk mengetahui tingkat konsentrasi uranium, thorium, dan potasium dengan mencacah sinar gamma yang dipancarkan

berdasarkan asal jenis nuklida dan tingkat energinya. Cacahan sinar gamma yang ditangkap oleh detektor selanjutnya diubah menjadi spektrum dan dibedakan berdasarkan jenis nuklida yang ditangkap.

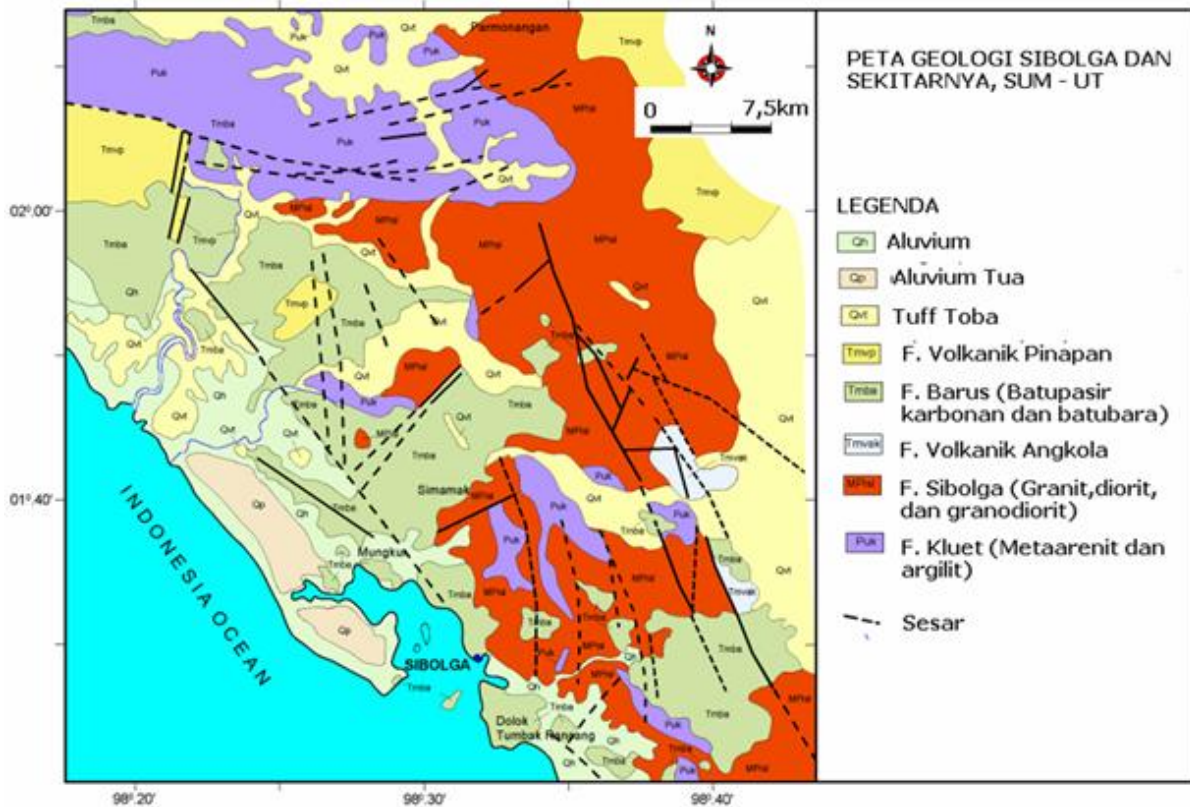
Evaluasi dilakukan terhadap 22 titik bor yang terdapat pada daerah Aloban, Sibolga. Analisis data dilakukan dengan rekonstruksi dan korelasi stratigrafi antar lubang bor, keterdapatannya anomali kadar uranium pada setiap lubang bor, dan analisis struktur sedimen untuk mengetahui lingkungan pengendapan.

Analisis proses akumulasi uranium didasarkan pada model akumulasi uranium pada batuan sedimen yang secara umum dapat dibagi ke dalam dua model lingkungan, yaitu lingkungan reduksi dan *resistat* [4]. Lingkungan reduksi merupakan suatu lingkungan pengendapan dimana uranium yang larut bersama air tanah dapat terakumulasi. Pada umumnya akumulasi terjadi dalam beberapa tahap perubahan lingkungan reduksi ke oksidasi yang menjadikan proses akumulasi yang terjadi menjadi semakin baik. Lingkungan *resistat* merupakan suatu lingkungan dimana uranium terikat secara kimia bersama mineral-mineral yang resisten terhadap pelapukan dan terendapkan pada batuan sedimen dalam bentuk endapan plaser sungai. Analisis proses akumulasi uranium juga didukung dengan pola sebaran setiap mineralisasi pada lapisan batuan yang sama.

DATA DAN HASIL PENELITIAN

Sibolga merupakan cekungan antar pegunungan yang secara geologi memungkinkan terbentuknya cebakan uranium tipe sedimenter. Sumber uranium berasal dari granit yang berumur Perem. Secara stratigrafi regional daerah Sibolga dibagi menjadi delapan formasi dari tua ke muda, yaitu: Formasi Kluet (metaarenit dan argilit), Formasi Sibolga (granit, diorit, dan granodiorit) berumur Perem Akhir–Trias Awal, Formasi Gunung api Angkola, Formasi Barus (batupasir karbonan dan batubara) berumur Oligosen–Miosen Awal, Formasi Gunung api Pinapan, Tuff Toba, Aluvium Tua, dan Aluvium berumur Kuartar [6]. Peta geologi regional terdapat pada Gambar 1. Hasil pengukuran geofisika diketahui permukaan granit secara umum sangat dangkal di sebelah timur dan menjadi semakin dalam di bagian tengah dan barat daya. Secara umum permukaan granit berada pada elevasi -121,01 sampai 170,72 meter dari permukaan laut [7].

Secara umum lokasi penelitian tersusun oleh Formasi Sibolga yang dapat dibedakan dalam enam satuan batuan, yaitu satuan granit, satuan konglomerat alas (konglomerat 1), satuan batupasir 1, satuan konglomerat 2, satuan batupasir 2, dan satuan endapan aluvial. Kondisi singkapan batuan di lapangan adalah seperti Gambar 2.



Gambar 1. Peta Geologi Regional daerah Sibolga dan sekitarnya [6].



Gambar 2. Singkapan batuan hasil pemetaan geologi: (a) singkapan granit pada bagian timur, (b) konglomerat alas, (c) lapisan batubara, (d) batupasir berlapis.

Secara rinci sebaran satuan batuan di daerah penelitian adalah seperti Gambar 3, dengan karakteristik batuan sebagai berikut:

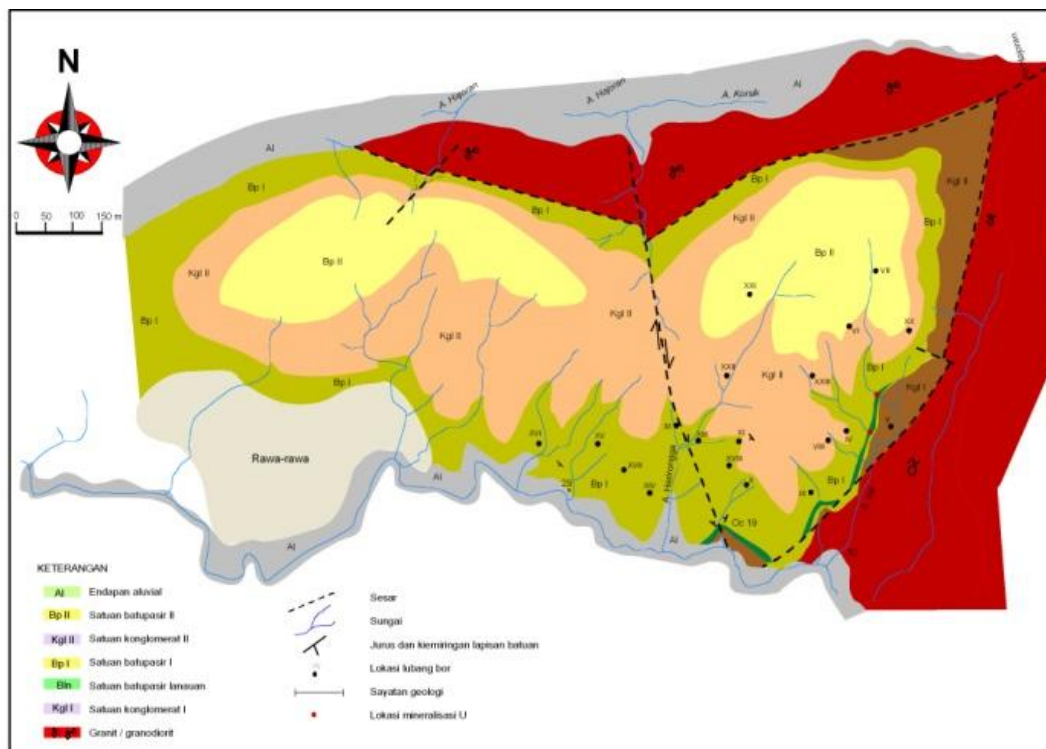
a. Satuan Granit

Satuan ini tersusun atas dua jenis batuan yang dapat dibedakan secara megaskopis, yaitu: granit bertekstur kasar dan granit dengan tekstur halus. Granit bertekstur kasar

tersebar di Aek Padabu-dabuan dan Aek Korsik, berwarna putih sampai kemerahan. Granit bertekstur halus ditemui di bagian timur laut daerah penelitian, berdekatan dengan Desa Hajoran. Warna batumannya adalah abu-abu kemerahan, tekstur halus, dan berkomposisi mineral sama dengan batuan granit bertekstur kasar.

b. Satuan Konglomerat Alas (Konglomerat 1/Kgl 1)

Satuan konglomerat alas merupakan satuan pertama yang diendapkan pada Formasi Sibolga yang menumpang di atas granit. Satuan ini secara umum merupakan konglomerat dengan fragmen-fragmen granit berukuran 5 cm–2,5 m, bentuk fragmen menyudut–membundar tanggung, kemas terbuka, pemilahan buruk, kekerasan sangat keras, massa dasar pasir dan feldspar.



Gambar 3. Peta geologi daerah penelitian.

c. Satuan Batupasir 1 (Bp 1)

Satuan ini merupakan batupasir konglomeratan memiliki sebaran terluas di lokasi penelitian. Satuan ini terdiri atas konglomerat, breksi, batupasir kasar, batulanau, dan batubara. Konglomerat pada umumnya berwarna kuning kecoklatan, fragmen berukuran 5–30 cm, kemas terbuka, dan sortasi buruk.

d. Satuan Konglomerat 2 (Kgl 2)

Satuan konglomerat ini tersusun oleh konglomerat dan breksi, berwarna coklat kekuningan–coklat tua, fragmen berukuran 5–20 cm, menyudut, kemas terbuka, matriks pasir kasar–sedang, dan sortasi buruk. Penyebaran satuan ini cukup luas berselingan dengan batupasir kasar, ketebalan lapisan bervariasi antara 1 sampai 3 m.

e. Satuan Batupasir 2 (Bp 2)

Batupasir ditemukan tersebar pada bagian tinggian di daerah penelitian. Penampakan di lapangan batupasir berwarna abu-abu kecoklatan–coklat muda, berbutir halus–

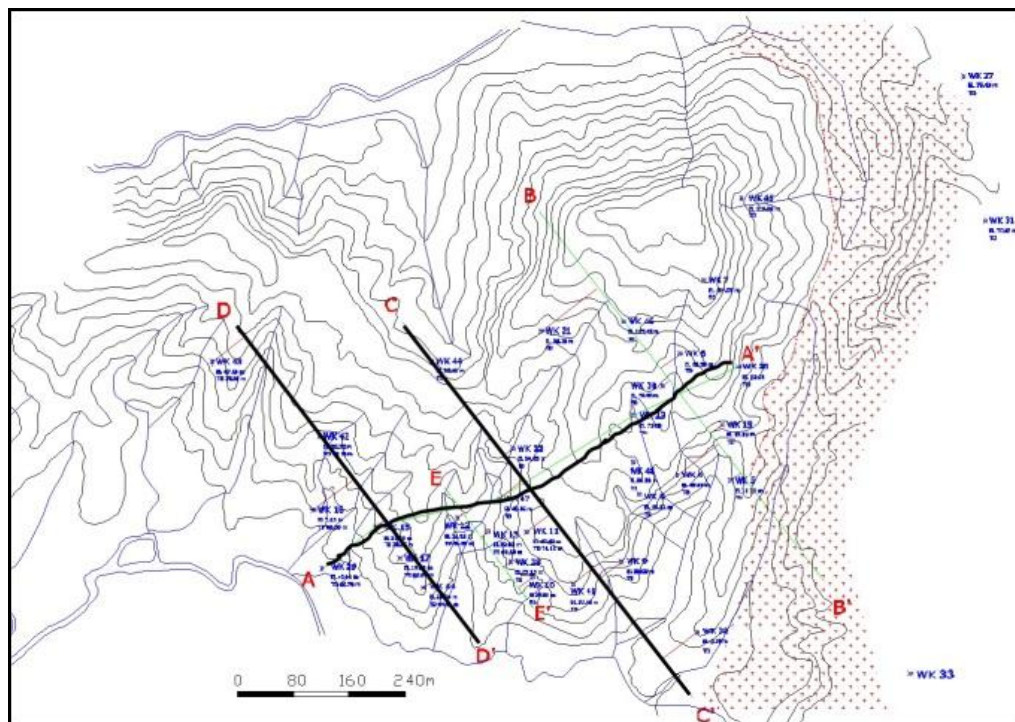
kasar, menyudut tanggung–membundar tanggung, sortasi baik, setempat diketemukan material karbon.

f. Satuan Endapan Aluvium (AI)

Satuan endapan aluvium tersebar merata di daerah dataran pada lokasi penelitian. Endapan aluvium terbentuk dari hasil erosi dan pengendapan batuan beku dan sedimen yang berada di sekitar lokasi penelitian.

Anomali Kadar Uranium

Eksplorasi uranium di daerah Aloban dilakukan pada tahun 1980-an hingga tahapan pemboran eksplorasi [7]. Pada daerah tersebut setidaknya telah dilakukan pemboran eksplorasi berjumlah 48 titik. Pada lokasi tersebut telah dilakukan logging geofisika dengan alat logging ST 22 dan GMT 3T yang memiliki keluaran kadar U_3O_8 [7]. Sebaran beberapa titik bor yang akan digunakan sebagai bahan evaluasi dan kondisi topografi daerah Aloban seperti pada Gambar 4.



Gambar 4. Peta topografi dan lintasan penampang geologi melintasi beberapa titik bor [7].

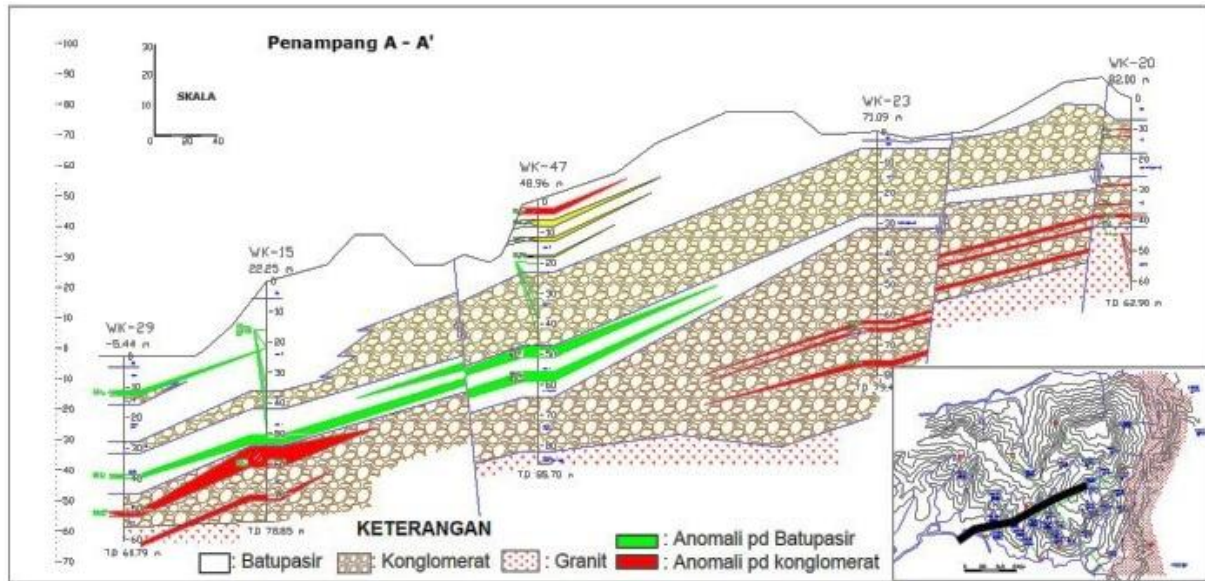
Berdasarkan data log batuan pada titik bor yang terdapat di daerah Aloban, dibuat penampang yang menghubungkan beberapa titik bor yang dianggap mewakili stratigrafi daerah Aloban. Penampang A-A' berarah barat daya-timur laut yang melalui lima titik bor yang memiliki kedalaman berbeda-beda, yaitu: WK-29 (60, 79 m), WK-15 (78,85 m), WK-47 (85,70 m), WK-23 (79,47 m), dan WK-20 (62,90m). Pada titik bor WK-29 yang terletak pada topografi paling rendah (-5,4 mdpl) menembus hingga batuan dasar granit dengan beberapa anomali kadar uranium pada konglomerat (52 m) dan pada batupasir (12,5 dan 40 m). Titik bor WK-15 dengan elevasi 22,25 mdpl menembus anomali pada konglomerat (54–61 m dan 71 m) dan pada batupasir (22 m dan 51 m). Titik WK-47 dengan elevasi 48,9 mdpl menembus hingga batuan dasar granit dan beberapa anomali pada batupasir (56 m, 49 m, 18 m, 12 m, 7 m, 3 m). Titik bor WK-23 dengan elevasi 71,09 mdpl sebagian besar menembus konglomerat dengan anomali pada batuan konglomerat (76

m, 65 m, dan 62 m). Titik bor WK-20 dengan elevasi 82 mdpl menembus hingga batuan dasar granit dan beberapa anomali kadar uranium pada batuan konglomerat (39 m, 35 m, 28 m, dan 11 m). Korelasi dari kelima titik bor tersebut seperti pada Gambar 5.

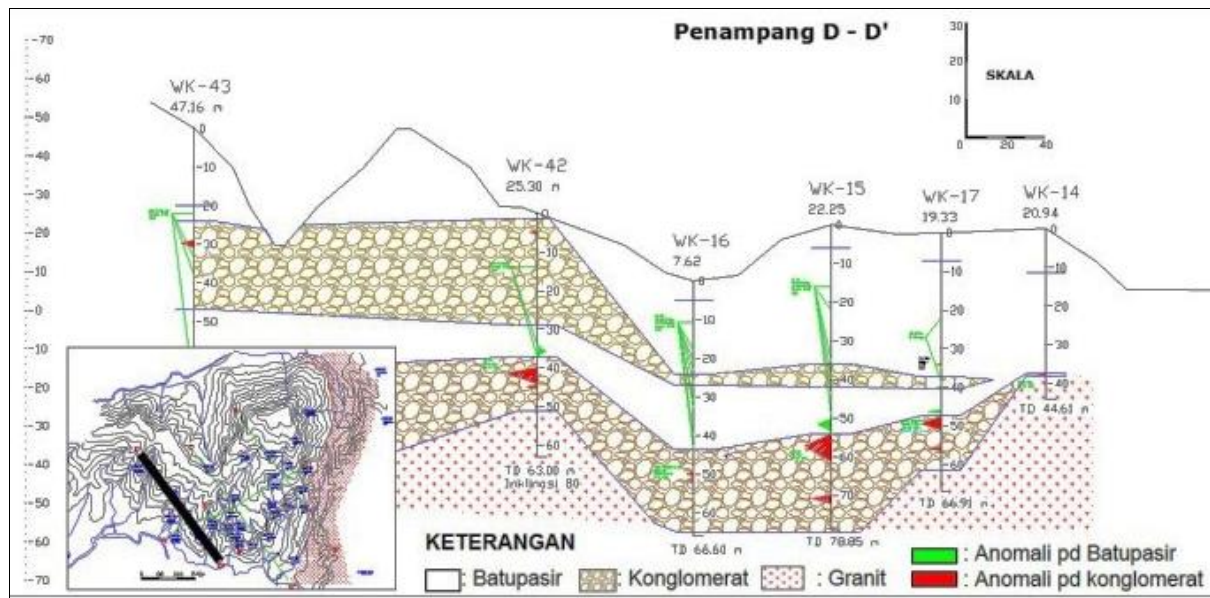
Penampang yang tegak lurus dengan penampang A-A' adalah penampang D-D' berarah barat laut-tenggara yang melalui 6 (enam) titik bor dengan kedalaman yang berbeda-beda, yaitu WK-43 (73,08 m), WK-42 (63 m), WK-16 (66,6 m), WK-15 (78,85 m), WK-17 (66,9 m), dan WK-14 (44,61 m). Titik bor WK-43 dengan elevasi 47,16 mdpl dengan inklinasi 70° menembus anomali kadar uranium pada konglomerat (30 m). Titik bor WK-42 terletak pada elevasi 25,3 mdpl dengan inklinasi 80° menembus hingga batuan dasar granit dengan anomali pada konglomerat (pada kedalaman 40–45 m dan 4 m) dan pada batupasir (35 m). Titik bor WK-16 pada elevasi 7,62 mdpl menembus anomali pada konglomerat (50 m) dan beberapa anomali dengan ketebalan

centimetrik pada batupasir. Titik Bor WK-15 dengan elevasi 22,25 mdpl menembus anomali pada konglomerat (70 m dan 55–60 m), dan pada batupasir (50 m dan beberapa anomali berukuran milimetrik). Titik bor WK-17 dengan elevasi 19,33 mdpl menembus hingga batuan dasar granit dan

anomali pada konglomerat (49 m dan 56 m) dan pada batupasir (46 m). Titik Bor WK-14 dengan elevasi 20,94 mdpl menembus hingga batuan dasar granit dan anomali pada konglomerat (38 m). Korelasi antartitik tersebut terdapat pada Gambar 6.



Gambar 5. Penampang A-A' yang mewakili beberapa titik bor berarah barat daya-timur laut.



Gambar 6. Penampang D-D' yang membentang dengan arah barat laut-tenggara.

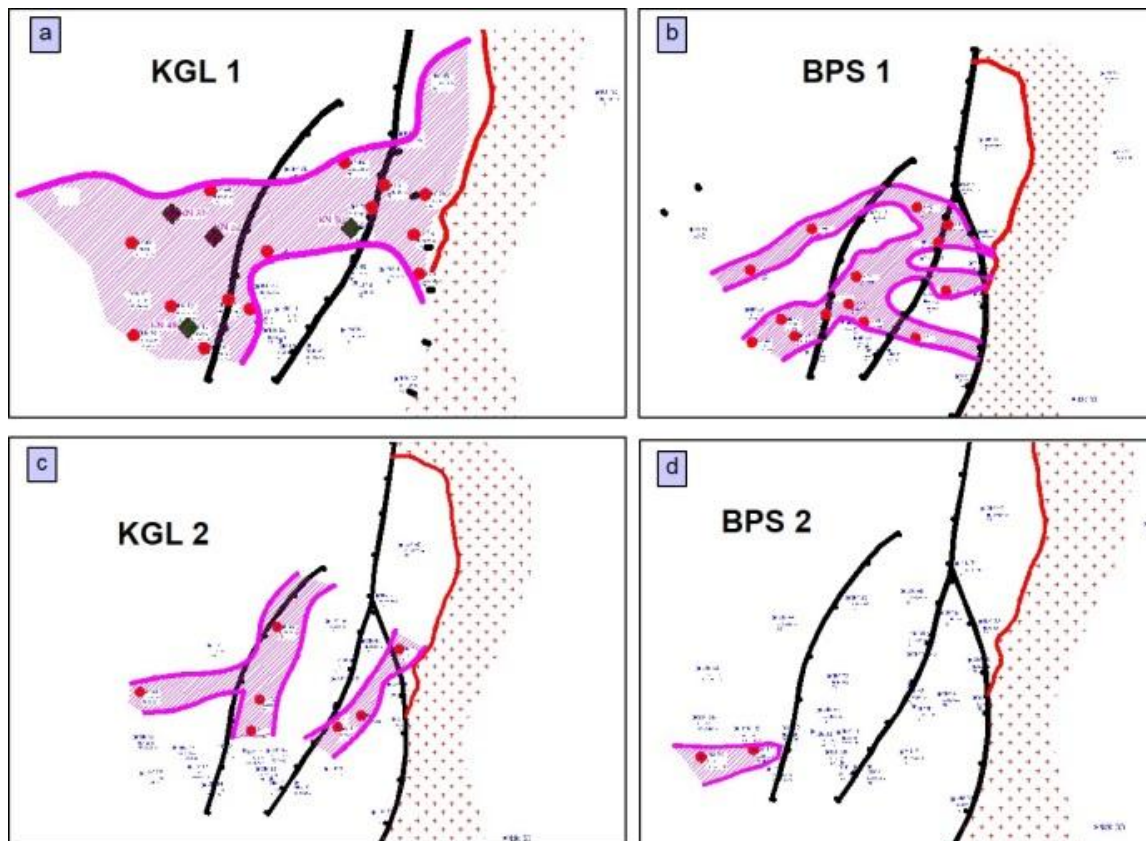
Selain dua penampang tersebut juga dibuat beberapa penampang lainnya.

hasil korelasi antarpennampang batuan dan anomali kadar uranium maka dapat dilakukan

pembuatan peta sebaran anomali kadar uranium berdasarkan batuan *favourable*. Hal ini dapat digunakan untuk menghitung luasan anomali kadar uranium pada lapisan batuan yang berbeda. Korelasi beberapa titik bor yang memiliki anomali pada satuan batuan yang sama. Dari korelasi tersebut didapatkan bentuk sebaran anomali. Sebaran anomali kadar uranium berdasarkan satuan batuan *favourable* seperti pada Gambar 7. Pada gambar tersebut dapat diketahui bahwa sebaran anomali kadar uranium yang paling luas terdapat pada satuan batuan konglomerat 1 (Kgl 1), kemudian sebaran pada satuan batupasir 1 (Bp 1) yang memperlihatkan sebaran anomali kadar uranium membentuk alur-alur berarah timur laut-barat daya. Pada

satuan batuan konglomerat 2 (Kgl 2) anomali kadar uranium membentuk pola alur (*channel*) yang berarah timur laut-barat daya. Sebaran anomali kadar uranium tersebut lebih rendah dari lapisan di bawahnya. Pada lapisan batupasir 2 yang merupakan lapisan paling atas pada daerah penelitian masih terdapat anomali kadar uranium pada dua titik bor.

Pola sebaran anomali kadar uranium pada setiap lapisan memiliki penyebaran menerus dari arah timur dan pada bagian barat memiliki pola yang tidak menerus. Pada satuan konglomerat 1 (Kgl 1) yang merupakan batuan sedimen yang memiliki kontak dengan batuan granit memiliki sebaran anomali kadar uranium yang lebih luas dibandingkan dengan batuan di atasnya.



Gambar 7. Sebaran anomali mineral radioaktif pada lubang bor, (a) pada batuan konglomerat 1, (b) pada batuan batupasir 1, (c) pada lapisan konglomerat 2, (d) pada lapisan batupasir 2.

Analisis Lingkungan Pengendapan

Analisis lingkungan pengendapan dilakukan dengan pengamatan keberadaan

struktur sedimen dan korelasi antarlubang bor untuk mengetahui penyebaran litologi secara horizontal dan vertikal. Berdasarkan

penampang litologi timur-barat, diketahui bahwa penyebaran konglomerat yang merupakan produk aliran debris mendominasi litologi di daerah penelitian. Analisis sistem pengendapan aliran debris dapat diamati dari keberadaan matriks berukuran pasir dengan dominan kemas terbuka (*matrix supported*) dan bentuk butir menyudut. Fragmen dari konglomerat alas merupakan batuan granit sampai dengan granodiorit dan berukuran centimetrik sampai dengan desimetrik. Struktur sedimen yang dapat diamati adalah *reverse graded* sampai *normal graded*. Ketebalan satuan konglomerat alas bervariasi dari 10 meter sampai mencapai hampir 50 meter. Di atas konglomerat alas, diendapkan batupasir kasar sampai batulanau dan merupakan endapan *abandoned channel*. Struktur sedimen yang berkembang pada lapisan ini adalah *parallel lamination* dan *graded bedding*. Secara umum dapat disimpulkan di lokasi penelitian berdasarkan pengamatan lapangan dan korelasi antara lubang bor bahwa siklus pengendapan aliran debris sampai endapan *abandoned channel* terjadi selama tiga kali.

Berdasarkan penampang A-A' yang merupakan penampang sejajar arah pengendapan dapat terlihat bahwa ketebalan satuan konglomerat menipis dari posisi proksimal ke posisi distal. Pada posisi tegak lurus arah pengendapan (penampang C-C'), lapisan konglomerat mempunyai pelampiran yang luas atau hampir selebar daerah penelitian (kurang lebih 1 km).

Berdasarkan kenampakan litologi dan keberadaan mineral dapat diketahui suasana pengendapan bervariasi dari lingkungan reduksi sampai oksidasi. Suasana lingkungan pengendapan reduksi terjadi pada endapan fraksi halus dan dicirikan dengan warna batuan keabuan serta mengandung material

karbon sampai batubara dan mineral pirit. Suasana oksidasi dapat terlihat dari warna batuan yang putih sampai kemerah-merahan dan dicirikan dengan keberadaan mineral hematit.

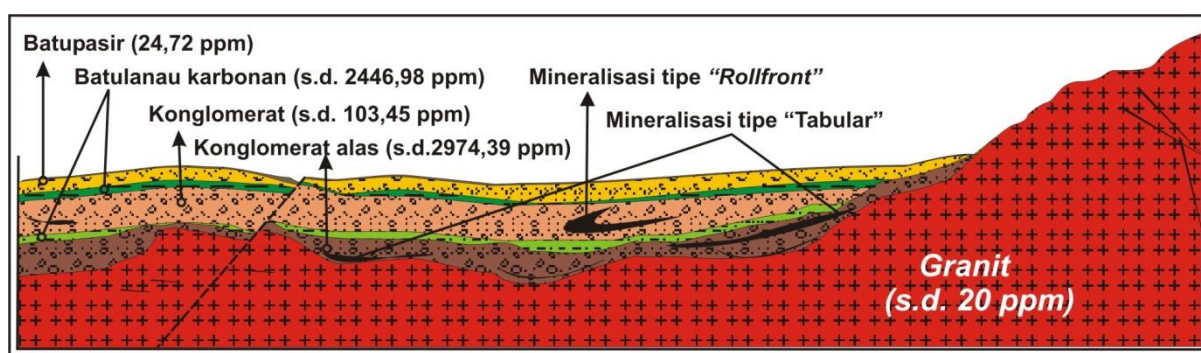
PEMBAHASAN

Tipe mineralisasi endapan uranium yang berhubungan dengan batuan granitik lebih banyak berhubungan dengan batuan *leucogranit peraluminous*. Batuan ini memiliki variasi komposisi yang sangat terbatas (biotit <10%) dan sangat berkorelasi dengan peningkatan indeks peraluminusitasnya dimana peningkatan kadar uranium berkaitan dengan tingkat fraksinasi [8]. Granit Sibolga dapat menjadi batuan sumber uranium karena telah mengalami proses pelapukan. Batuan yang mengandung uranium apabila mengalami proses pelapukan dan dialiri oleh air tanah maka akan menyebabkan pembebasan uranium dan unsur kimia lainnya dan terbawa oleh larutan air tanah [9]. Keterdapatannya uranium pada air tanah hanya akan bertahan pada kondisi oksidasi dalam bentuk uranil (U(VI)) dan kondisi redoks akan mengontrol perubahan kondisi uranium dalam air tanah menjadi mineral akibat tingkat kelarutan yang sangat berbeda sehingga dalam kondisi reduksi akan segera terbentuk mineral dengan jenis uranium U(IV) pada batuan sedimen [10].

Berdasarkan tipe pengendapannya, keterdapatannya mineralisasi uranium pada lingkungan batuan sedimen dibagi ke dalam tiga kelompok utama, yaitu cebakan zona redoks pada lingkungan pengendapan laut (SR_{tm}), cebakan zona redoks pada lingkungan darat/benua (SR_{tc}), dan kristalisasi kimia yang berhubungan dengan endapan cebakan pada zona redoks (SC_{cr}).

Berdasarkan kondisi geologi daerah Sibolga terbentuk pada lingkungan pengendapan darat [2]. Hubungan yang kuat antara material organik dengan endapan uranium dalam batuan sedimen serta pada perubahan karakteristik pengendapan, baik secara fisik maupun komposisi kimia yang terbentuk secara bersamaan dengan perubahan pada daerah oksidasi yang dipengaruhi oleh oksidasi akibat pengaruh atmosfer dan kondisi reduksi merupakan proses kimia yang

sangat penting akibat pengaruh dari material organik dalam proses pembentukan tipe endapan uranium [4]. Uranium dapat terendapkan dan membentuk mineral uraninit oleh penyerapan pada material organik dan/atau oleh reduksi UO_2^{2+} akibat aktivitas bakteri anaerobik [1]. Tipe endapan uranium yang mungkin terbentuk pada daerah Sibolga seperti ilustrasi pada Gambar 8.



Gambar 8. Ilustrasi proses pembentukan dan jenis endapan mineral radioaktif pada batuan sedimen dengan batuan sumber granit.

Evaluasi Pembentukan Mineralisasi Uranium

Berdasarkan keseluruhan data yang dikumpulkan baik berupa data sekunder maupun data primer yang berupa data geologi regional, pemboran, log geofisika, pemetaan geologi, radiometri, mineralogi, dan lain-lain maka dapat dilakukan suatu evaluasi sistem pengendapan uranium pada sektor Aloban. Analisis ditekankan lebih kepada genesa akumulasi uranium pada batuan sedimen dan tidak kepada proses diferensiasi magma yang menyebabkan terbentuknya mineralisasi uranium. Mineral yang terbentuk di daerah ini adalah *uraninite*, *carnotite*, dan *coffinite* [5].

Hasil analisis dapat dijabarkan bahwa proses pembentukan Formasi Sibolga dan mineralisasi radioaktif terbentuk dalam beberapa tahap. Pembekuan atau pembentukan batuan granit terjadi pada

Perem Akhir sampai Trias Awal, atau sekitar 250 juta tahun yang lalu dan merupakan granit tipe S [6, 2]. Hal ini memungkinkan terkandungnya unsur uranium yang cukup tinggi pada tubuh batuan granit dan dapat terbebaskan pada saat proses pelapukan [9]. Pengendapan batuan sedimen yang merupakan hasil rombakan dari granit terjadi pada Oligosen–Miosen Awal [6, 11]. Pengendapan batuan sedimen tersebut diawali dengan adanya gejala pensesaran normal yang menyebabkan terjadinya perbedaan elevasi dan memungkinkan terbentuknya endapan batuan sedimen pada sistem kipas aluvium yang mengandung material organik dan membentuk lapisan serpih hitam pada satuan batuan konglomerat dan batupasir. Bersamaan dengan pengendapan batuan sedimen terjadi pelarutan unsur radioaktif dari batuan dan lapukan batuan granitik dan

terlarut di dalam air tanah berbentuk uranil (U(VI)). Unsur uranium yang berupa uranil akan segera terendapkan pada lapisan yang kaya akan material organik dan berubah menjadi (U(IV)) yang berbentuk mineral *uraninite*, *carnotite*, dan *coffinite*.

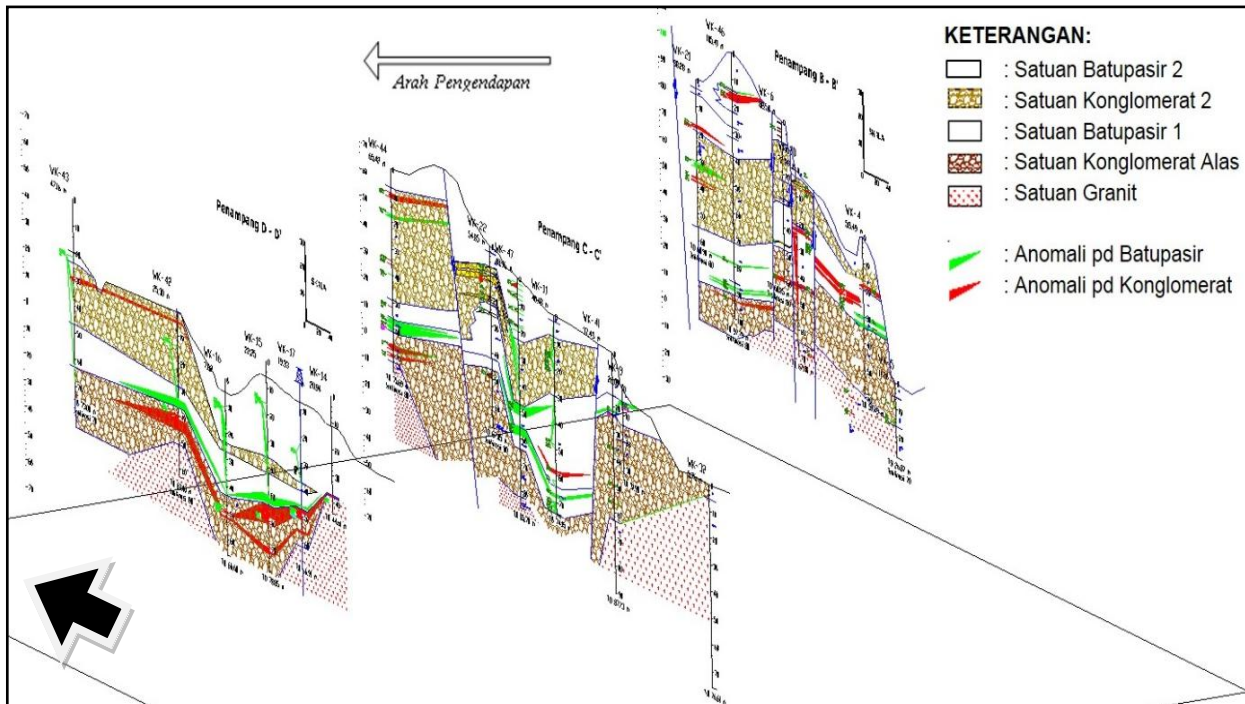
Berdasarkan korelasi data litologi dari sumur pemboran dan data anomali radiometri dari *log gamma ray* maka dapat diketahui keberadaan akumulasi mineral/unsur radioaktif uranium dan thorium. Berdasarkan data tersebut diketahui bahwa penyebaran anomali unsur radioaktif tersebar merata pada litologi konglomerat, batupasir, dan batulanau. Berdasarkan data tersebut diketahui bahwa lingkungan pengendapan pada saat kondisi reduksi tidak hanya pengaruh dari kandungan material organik pada batuan tetapi pengaruh kondisi lingkungan pengendapan secara umum.

Dengan memperhatikan data penyebaran akumulasi uranium maka diketahui bahwa proses mineralisasi tidak hanya terjadi selama satu kali bersamaan dengan proses sedimentasi (*syn-sedimentation/syn-genetic*) tetapi mineral yang mengandung uranium seperti monasit juga telah terbentuk pada batuan granit sebelumnya karena mineral monasit mempunyai ikatan kimia kuat sehingga mengikat unsur uranium [12].

Mineral radioaktif pada awalnya terbentuk pada saat pembentukan batuan granit berupa monasit yang mengandung uranium, thorium, dan unsur tanah jarang (REE). Pada proses selanjutnya akan terbentuk sebagai mineral robakan granit penyusun batuan sedimen [13, 14].

Pengendapan mineral radioaktif berupa *uraninite*, *carnotite*, dan *coffinite* terbentuk pada proses redoks dengan kondisi reduksi yang dipengaruhi oleh kandungan material organik yang cukup tinggi [15] sehingga keterdapatannya hanya terbentuk pada serpih hitam yang kaya akan material organik [3]. Pengendapan uranium pada batuan sedimen berasal dari arah timur dan mengikuti arah aliran air tanah membentuk beberapa pola alur yang berarah timur laut- barat daya. Pada bagian timur di sekitar kontak antara batuan sedimen dengan granit, mineralisasi uranium didominasi oleh mineral hasil rombakan granit (monasit) dengan penyebaran yang cukup luas, terutama pada satuan batuan konglomerat 1. Semakin ke atas keterdapatan mineral radioaktif membentuk pola alur (*channel*) yang berarah timur laut-barat daya yang menunjukkan bahwa batuan induknya terbentuk dalam suatu pola pengendapan sungai teranyam [16, 17].

Pada daerah timur mineralisasi berupa hasil rombakan sehingga kaya akan uranium, thorium, dan unsur tanah jarang (REE) sedangkan pada bagian barat daya mineralisasi uranium berbentuk tabular dan lebih kaya akan kandungan uranium. Hal ini menunjukkan bahwa kondisi lingkungan pengendapan di bagian timur masih berupa lingkungan oksidasi yang menyebabkan terlarutnya unsur uranium dan terendapkan di bagian baratdaya yang merupakan lingkungan pengendapan reduksi [14, 18]. Korelasi pengendapan batuan di Sibolga adalah seperti Gambar 9.



Gambar 9. Bentuk dan sebaran mineralisasi uranium pada Formasi Sibolga berdasarkan korelasi data pemboran.

KESIMPULAN

Mineralisasi uranium pada batuan sedimen Formasi Sibolga sangat dipengaruhi oleh kondisi redoks pada lingkungan pengendapan darat. Mineral yang mengandung uranium, thorium, dan REE berupa monasit terbentuk pada saat pembentukan granit tipe S yang merupakan batuan sumber unsur uranium dan mengalami pelepasan uranium akibat proses pelapukan. Hasil pencucian uranium terendapkan pada bagian barat daya pada lingkungan pengendapan reduksi berupa mineral *uraninite*, *carnotite*, dan *coffinite*. Pengendapan uranium pada bagian timur merupakan mineralisasi epigenetik yang berbentuk tabular sedangkan pada bagian barat daya mineralisasi uranium terbentuk secara *syn-genetic* yang berbentuk tabular terutama pada lapisan yang kaya material organik.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kami ucapkan kepada Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir atas penyediaan data bor (tidak dipublikasikan) yang sangat membantu dalam analisis lingkungan pengendapan dan evaluasi pembentukan mineralisasi uranium di daerah penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] P. Bruneton and M. Cuney, *Geology of Uranium Deposits*, no. 1956. Elsevier Ltd, 2016.
- [2] R. P. Kusumadinata and S. Sastrowihardjo, "Uranium Prospect in Tertiary Sediments in the Sibolga Area, North Sumatera," in *Uranium Deposits in Asia and the Pacific: Geology and Exploration*, 1988, pp. 121–140.
- [3] 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 Sci.*

- Rev., 2016.
- [4] C. S. Spirakis, “The Roles of Organic Matter in the Formation of Uranium Deposits in Sedimentary Rocks,” vol. 8, pp. 53–69, 1996.
- [5] M. Masdja, S. Sastrowihardjo, and P. Tampubolon, “Uranium Mineralisation in Sibolga Formation at Aloban, North Sumatera,” In *Seminar on Uranium Exploration, Geology and Extraction*, 1989, pp. 123–144.
- [6] J. A. Aspde, W. Kartawa, D. T. Aldiss, A. Djunuddin, D. Diatma, M. C. G. Clarke, R. Whandoyo, dan H. Harahap, “Peta Geologi Lembar Padang Sidempuan dan Sibolga, Sumatera,” Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, 1992.
- [7] A. G. Muhammad, M. Nurdin, H. Syaeful, dan P. Widito, “Survey Geolistrik Tahanan Jenis di Daerah Aloban dan Sekitarnya, Sibolga, Sumatera Utara,” *Eksplorium*, vol. 33, no. 1 Mei, 2012.
- [8] M. Cuney, “The Extreme Diversity of Uranium Deposits,” *Miner. Depos.*, vol. 44, no. 1, pp. 3–9, 2009.
- [9] 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.*, pp. 6–11, 2016.
- [10] D. Cinti, P. P. Poncia, L. Brusca, F. Tassi, F. Quattrocchi, and O. Vaselli, “Spatial Distribution of Arsenic, Uranium and Vanadium in the Volcanic-Sedimentary Aquifers of the Vicano-Cimino Volcanic District (Central Italy),” *J. Geochemical Explor.*, vol. 152, pp. 123–133, 2015.
- [11] K. Ullah, N. U. Khattak, A. A. Qureshi, M. Akram, H. A. Khan, and A. Nisar, “Search for Uranium Source in Warcha Sandstone, Salt Range, Pakistan, Using SSNTD Technique,” vol. 40, pp. 491–495, 2005.
- [12] M. Cuney, A. Emetz, J. Mercadier, V. Mykchaylov, V. Shunko, and A. Yuslenko, “Uranium Deposits Associated with Na-Metasomatism from Central Ukraine: A Review of Some of the Major Deposits and Genetic Constraints,” *Ore Geol. Rev.*, vol. 44, pp. 82–106, 2012.
- [13] M. Min, J. Chen, J. Wang, G. Wei, and M. Fayek, “Mineral Paragenesis and Textures Associated with Sandstone-Hosted Roll-Front Uranium Deposits, Nw China,” vol. 26, pp. 51–69, 2005.
- [14] S. M. Zaid, M. I. Moustafa, and M. G. Barakat, *Mineralogy, Chemistry and Radioactivity Of The Heavy Minerals in the Black Sands, along the Northern Coast Of Egypt*. Elsevier Ltd, 2016.
- [15] J. Eagling, P. J. Worsfold, W. H. Blake, and M. J. Keith-Roach, “Influence of Sediment Redox Conditions on Uranium Mobilisation During Saline Intrusion,” *Chem. Geol.*, vol. 357, pp. 158–163, 2013.
- [16] S. Ortaboy and G. Atun, “Kinetics and Equilibrium Modeling of Uranium(Vi) Sorption by Bituminous Shale from Aqueous Solution,” *Ann. Nucl. Energy*, vol. 73, pp. 345–354, 2014.
- [17] Q. J. Fisher and P. B. Wignall, “Palaeoenvironmental Controls on the Uranium Distribution in an Upper Carboniferous Black Shale (Gastrioceras Listeri Marine Band) and Associated Strata; England,” *Chem. Geol.*, vol. 175, no. 3–4, pp. 605–621, 2001.

- [18] I. H. Saleh and A. A. Abdel-Halim,
“Determination of Depleted Uranium
Using a High-Resolution Gamma-Ray
Spectrometer and Its Applications in
Soil and Sediments,” *Integr. Med. Res.*,
2015.