

**STUDI KEBERADAAN MINERALISASI URANIUM  
DI DAERAH BIAK NUMFOR, PROVINSI PAPUA BARAT*****STUDY OF URANIUM MINERALIZATION OCCURRENCES  
AT BIAK NUMFOR, WEST PAPUA PROVINCE*****Suharji, Lilik Subiantoro, Heri Syaeful, Kurnia Setiawan Widana, Hery Prabowo**

Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir – BATAN

E-mail: shi@batan.go.id

Naskah diterima: 3 Oktober 2014, direvisi: 9 Oktober 2014, disetujui: 19 November 2014

**ABSTRAK**

Penelitian ini dilakukan berdasarkan adanya temuan indikasi mineral radioaktif berupa anomali laju dosis radiasi bernilai relatif tinggi. Hipotesis yang mendasari keberadaan laju dosis radiasi tinggi adalah pengendapan uranium yang berasal dari batuan basal Formasi Auwea, pengkayaan uranium yang berasal dari batugamping pada tanah permukaan, dan pengendapan uranium yang berasal dari penggunaan pupuk pertanian. Penelitian yang dilakukan bertujuan untuk mendapatkan kesimpulan dari beberapa hipotesis tersebut. Metode penelitian yang diterapkan adalah pemetaan geologi, pengukuran radiometri, kadar uranium (U), thorium (Th), dan potassium (K) di lapangan dengan menggunakan RS 125 untuk mengetahui kadar unsur secara insitu, pengukuran radiometri pupuk tanaman, pengambilan contoh, dan analisis kadar unsur di laboratorium. Berdasarkan hasil analisis dan evaluasi data survei diketahui bahwa di daerah sekitar Maryendi, Darmapis, dan Denafi, terindikasi adanya zona anomali uranium (U) yang dicirikan oleh keberadaan tanah berwarna coklat tua – coklat kemerahan, dengan nilai dosis radiasi 1,9 sampai 4.032,3 nSv/jam dan kadar uranium (U) berkisar antara 20,27 – 325 ppm eU. Berdasarkan hasil analisis batuan sumber uranium, disimpulkan batugamping merupakan batuan sumber uranium di lokasi penelitian. Hasil pengamatan lapangan terhadap pupuk dan batuan basal Formasi Auwea tidak ditemukan anomali yang dapat mengindikasikan material/batuan tersebut bertindak sebagai sumber uranium.

**Kata kunci:** anomali, radioaktivitas, uranium, Biak, Papua**ABSTRACT**

*This study was conducted based on the findings of radioactive minerals in the form of indication of relatively high radiation dose rate anomalies. The hypothesis underlying the existence of a high radiation dose rate is the deposition of uranium derived from basalt rock Auwea Formation, uranium enrichment derived from limestone to the soil surface, and the deposition of uranium resulted from the use of fertilizers in agriculture. Therefore the research aimed to obtain the conclusion of its hypotheses. Research methodology applied is geological mapping, radiometric measurement of uranium (U), thorium (Th), and potassium (K) in the field using RS 125 to determine in-situ grade of elements, radiometric measurements of plant fertilizer, sampling, and laboratory analysis of the element grade. Based on the analysis and*

evaluation of survey data it is known that in the area around Maryendi, Darmapis and Denafi, indicate the presence of anomalous zones which is characterized by the presence of uranium (U) dark brown soil – reddish brown, with the value of the radiation dose of 1.9 to 4,032.3 nSv/h and grade of uranium (U) has 20.27 to 325 ppm eU. Based on the analysis of source rock of uranium, it is concluded that limestone is the source rock of uranium in research area. The results of field observations of the fertilizer and basalt rock of Auwea Formation, it is found that no anomalies may indicate material/rock that acts as the source of uranium.

**Keywords:** anomaly, radioactivity, uranium, Biak, Papua

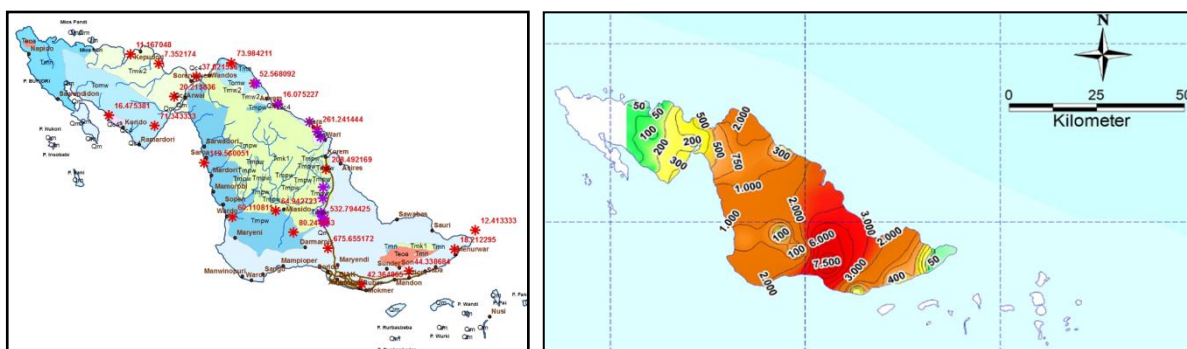
## PENDAHULUAN

Hasil survei dosis radiasi lingkungan menunjukkan di daerah Biak Numfor memiliki nilai anomali laju dosis radiasi yang cukup signifikan<sup>[1]</sup>. Keterdapatannya nilai anomali laju dosis radiasi terukur pada soil tebal yang tersebar di atas endapan Formasi Mokmer yang tersusun oleh batugamping koral dan kapur. Pada Formasi tersebut, nilai laju dosis radiasi pada tanah mencapai 675 nSv/jam, sedangkan kandungan Ra-226 dapat mencapai 7500 ppm (Gambar 1)<sup>[1]</sup>.

Hasil pengukuran laju dosis radiasi pada tanah yang relatif tinggi tersebut merupakan fenomena geologi yang menarik, terutama disebabkan daerah anomali yang merupakan penyebaran batuan karbonat yang pada umumnya tidak mengandung unsur radioaktif dengan nilai yang tinggi. Beberapa alternatif hipotesis untuk mengenai sumber keterdapatannya uranium di daerah ini adalah:

1. uranium berasal dari batuan lava basal (Formasi Auwea) terlarut pada airtanah dan terendapkan pada daerah sekitar sumber uranium
2. uranium berasal dari pupuk urea yang digunakan untuk tanaman
3. uranium berasal dari batuan karbonat dimana anomali ditemukan

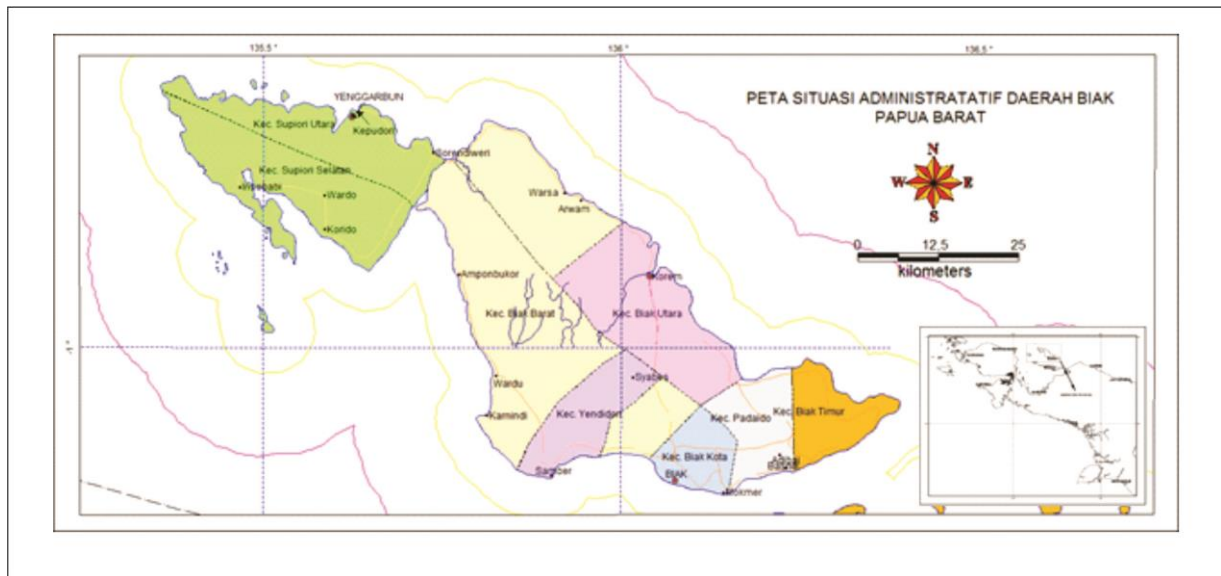
Metodologi penelitian yang akan diterapkan terutama adalah dengan pengukuran radiometri tanah dan batuan di seluruh pulau untuk menentukan batuan yang bertindak sebagai sumber uranium. Selain itu, pengambilan contoh pupuk akan dilakukan untuk mengetahui kemungkinannya sebagai sumber tingkat radiasi yang tinggi pada tanah. Asumsi yang diterapkan pada penelitian adalah radiasi yang ditangkap oleh detektor berasal dari kandungan uranium atau thorium, bukan berasal dari radionuklida lain seperti radium.



Gambar 1. Peta distribusi pengukuran laju dosis radiasi (kiri), dan peta sebaran konsentrasi Ra-226 di permukaan tanah (kanan).

Tujuan penelitian ini adalah untuk memperoleh informasi sebaran, karakter geologi keberadaan uranium, sebaran lokasi daerah anomali, dan genesis keberadaan anomali di lokasi penelitian. Lokasi penelitian

secara administratif termasuk ke dalam daerah Kabupaten Biak Numfor, Provinsi Papua Barat dengan luas daerah keseluruhan  $\pm 2.200 \text{ km}^2$  (Gambar 2).



Gambar 2. Peta administrasi lokasi penelitian di Pulau Biak

## METODOLOGI

Dalam rangka mencapai tujuan dan menjawab hipotesis di atas maka metode penelitian dan tahapan kerja yang dilakukan diantaranya adalah sebagai berikut:

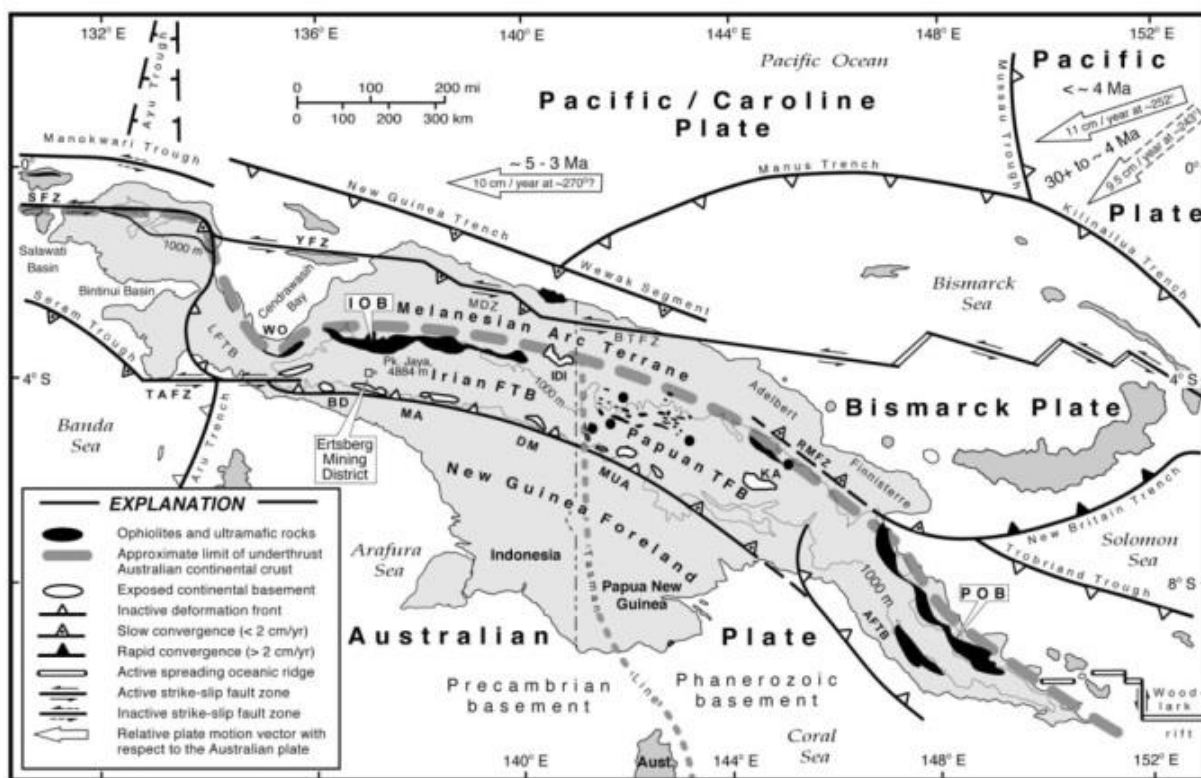
1. Pemetaan geologi bertujuan untuk menentukan lokasi obyek, karakter geologi, meliputi sebaran dan variasi batuan, dan stratigrafi.
2. Pengukuran radioaktivitas, dengan pendataan radioaktivitas latar dan penentuan daerah anomali, selain itu pengukuran radioaktivitas setiap satuan batuan/formasi untuk menentukan atau memperkirakan batuan sumber uranium dengan menggunakan detektor gamma RS 125.
3. Pengukuran radioaktivitas pupuk untuk pertanian dan metoda penyebaran pupuk pada lahan pertanian.
4. Pengambilan contoh tanah dan batuan serta preparasi contoh, meliputi kegiatan pengambilan contoh di lokasi pengamatan, pengeringan contoh dan penimbangan serta pengukuran radioaktivitas contoh terambil.
5. Analisis kadar unsur pada tanah dan batuan di laboratorium menggunakan *XRF desktop*. Analisis dilakukan dengan terlebih dahulu melakukan preparasi contoh sehingga ideal untuk pengukuran kadar menggunakan XRF.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

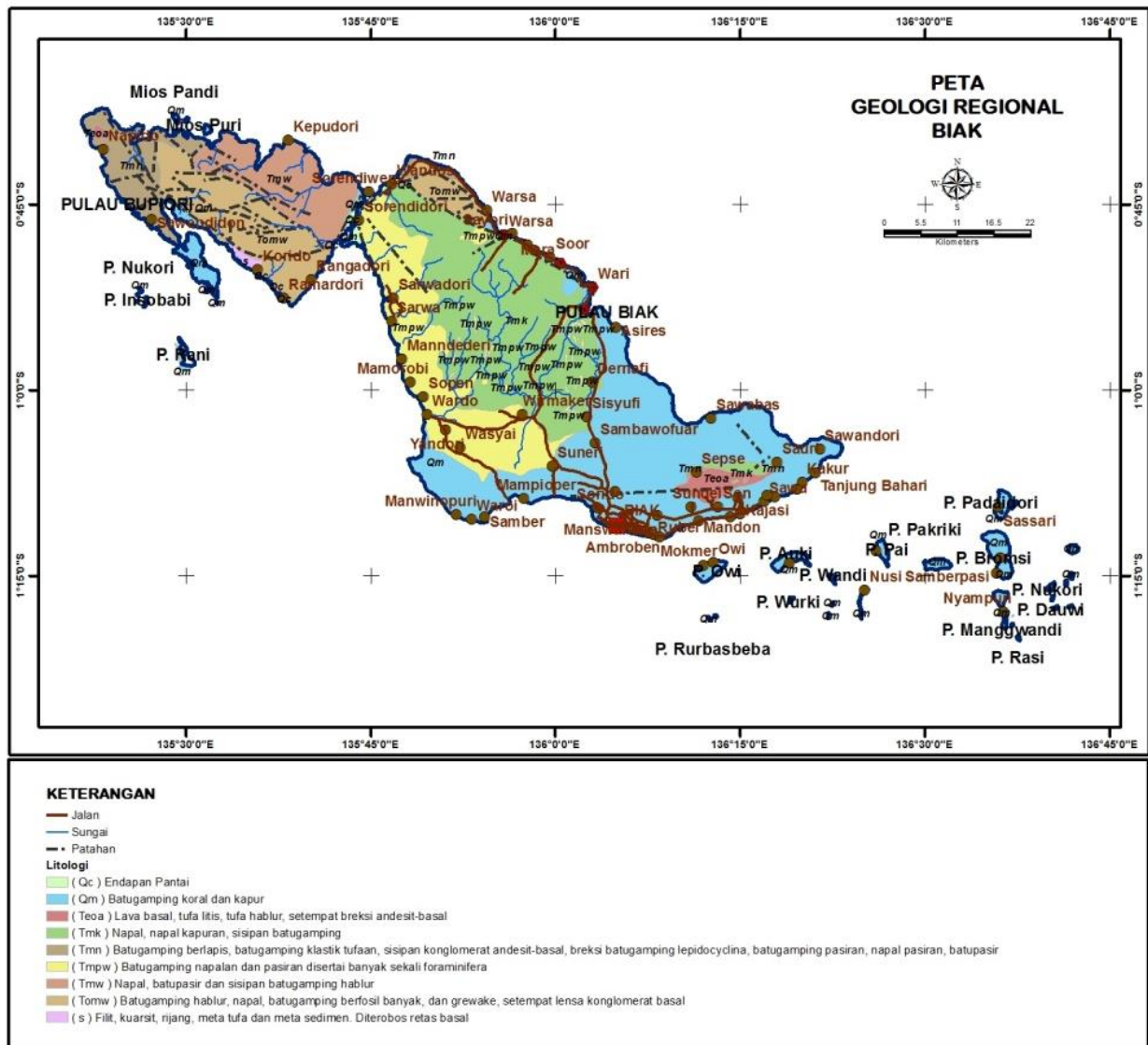
### Geologi

Struktur geologi regional yang berkembang antara lain berupa perlipatan, sesar dan kekar. Satuan batuan yang mengalami pengaruh tektonik antara lain batuan sedimen Pra-Tersier (Batuan Malihan Korido). Perlipatan pada batuan tersebut terbentuk oleh adanya tekanan horizontal pada kala Miosen Akhir-Pliosen. Disamping produk tektonik berupa lipatan dan patahan, terbentuk juga daerah-daerah cekungan yang berkembang sebagai akibat gaya *extension* dari aktivitas patahan bersistem *left lateral slip fault* NE-SW yang menyebabkan pembentukan Basin Salawati, Bintuni, dan Akimeugah (Gambar 3)<sup>[2]</sup>. Pensesaran di daerah penyelidikan terdiri atas sesar naik hingga sungkup, sesar normal, dan sesar geser.

Berdasarkan Peta Geologi Regional Lembar Biak (Gambar 4), Skala 1:250.000<sup>[3]</sup>, tatanan stratigrafi daerah penyelidikan tersusun atas beberapa formasi batuan dari tua ke muda sebagai berikut: Batuan Malihan Korido (S) berumur Kapur, Formasi Auwea (Teoa) berumur Eosen dan secara tidak selaras menutupi batuan malihan Korido, Formasi Wainukendi (Tomw) berumur Miosen Awal bagian bawah, Formasi Wafordori (Tmw) berumur Miosen Awal bagian Atas dan secara selaras menutupi Formasi Wainukendi, Formasi Napisendi (Tmn) berumur Miosen Tengah, Formasi Korem (Tmk) berumur Miosen Akhir bagian Bawah, Formasi Wardo (Tmpw) berumur Plistosen Bawah, Formasi Manokwari (Qpm) berumur Plistosen Bawah, Formasi Mokmer (Qm) berumur Plistosen Atas, dan terakhir berupa Endapan Pantai (Qc), Alluvial (Qa).



Gambar 3. Peta tektonik regional daerah Biak<sup>[2]</sup>.



Gambar 4. Peta geologi regional daerah Biak<sup>[3]</sup>.

Dari hasil pengamatan formasi batuan di bagian tengah daerah penelitian merupakan Formasi Mokmer (Qm) yang tersusun oleh batugamping klastis dan batugamping terumbu (Gambar 5, 6, dan 7). Batuan karbonat di lokasi penelitian diklasifikasikan

sebagai *bafflestones* atau *floatstone* batugamping dengan matriks *packstone*, bagian bawah tersusun oleh rombakan berupa material lempung dan pasir dengan kandungan *crinoida*, *algae*, *brachiopoda*, dan *ostracoda*.



Gambar 5. Singkapan batugamping klastis (kiri) dan batugamping kristalin menunjukkan pengendapan stalagtit (kanan).



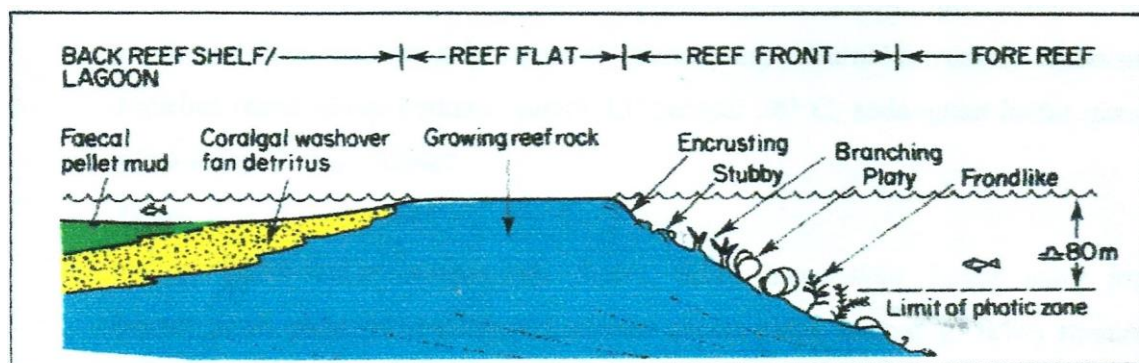
Gambar 6. Singkapan batugamping terumbu di daerah Maryendi dan batugamping klastis berbutir halus tufaan.



Gambar 7. Singkapan batugamping terumbu di daerah Maryendi dan batugamping klastis berbutir halus tufaan.

Berdasarkan pertumbuhan fasies batugamping terumbu daerah tersebut termasuk dalam terumbu karang *back reef* yang dipengaruhi oleh kondisi energi rendah (Gambar 8)<sup>[4]</sup>. Posisi lingkungan ini terisolir di belakang *reef flat* atau *reef crest* yang mempunyai sifat reduktif sehingga berpotensi untuk terjadinya pengendapan unsur yang

berasal dari rombakan, pelarutan batuan sumber terjadi lebih intensif. Cekungan yang berkembang akibat tektonik tersebut merupakan cekungan terisolir pada bagian tepi daratan sehingga berpeluang untuk pertumbuhan koral batugamping dan presipitasi larutan mengandung unsur radioaktif.



Gambar 8. Penampang melintang pembentukan batugamping berdasarkan perbedaan zona batas lingkungan batugamping terumbu<sup>[4]</sup>.

### Radioaktivitas dan Dosis Radiasi Lingkungan

Pengukuran radioaktivitas dan dosis radiasi lingkungan dilakukan dengan menggunakan detektor gamma RS 125 baik pada soil maupun pada batuan permukaan. Berdasarkan hasil survei laju dosis radiasi di seluruh lintasan diketahui nilai kisaran laju dosis radiasi soil 1,9 – 4.032,3 nSv/jam. Nilai radioaktivitas dan dosis ekstrem yang cukup signifikan (>50 nSv/jam) terdapat di area berkadar uranium (U) relatif tinggi, yaitu di daerah Darmapis, Maryendi dan antara Desa Maryendi – Susefi (Gambar 9). Dari hasil pengukuran detil di daerah Maryendi, dikenali bahwa sebaran dosis radiasi lingkungan cenderung terdapat pada lembah-lembah antar bukit, pola sebaran setempat-setempat tidak teratur. Daerah tersebut pada umumnya difungsikan oleh penduduk sebagai lahan bercocok tanam.

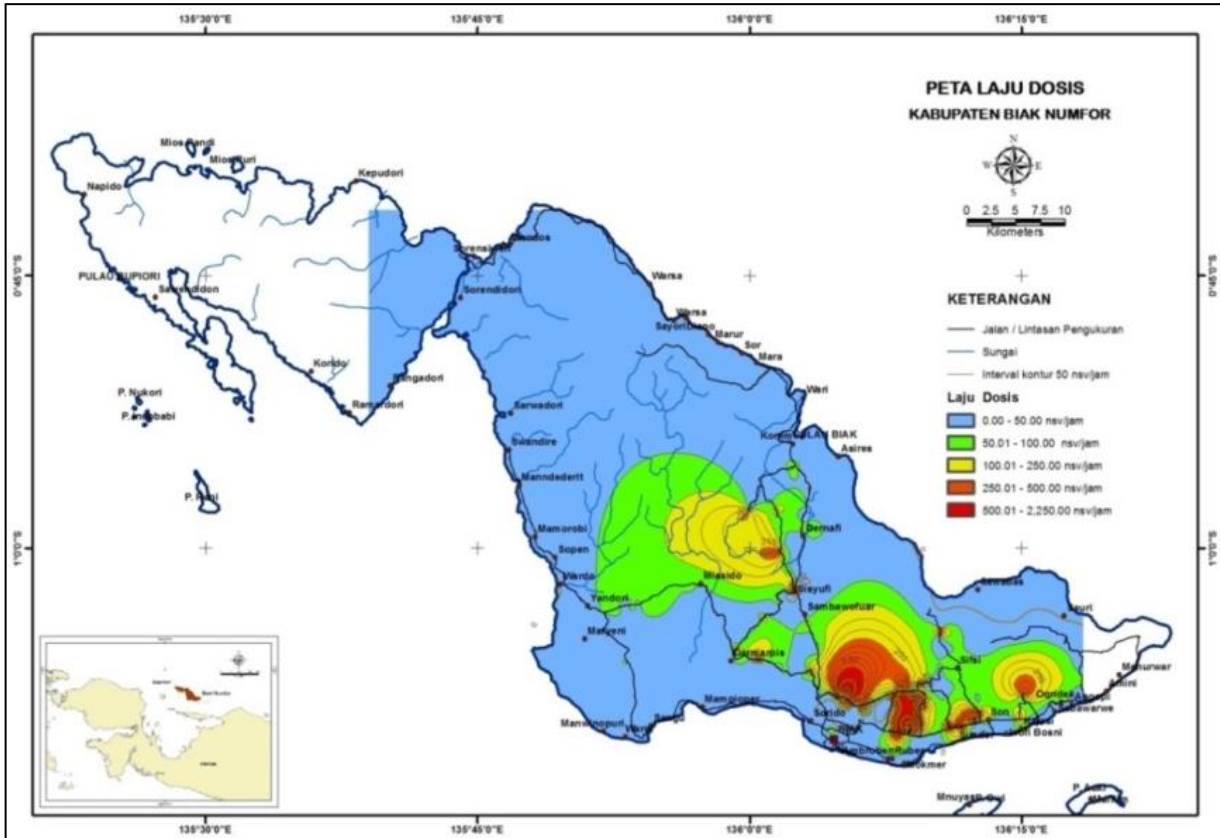
Pada tahapan awal penelitian ini, dilakukan pencarian contoh pupuk urea yang digunakan oleh petani untuk bercocok tanam. Pada umumnya petani tidak menggunakan pupuk untuk bercocok tanam, atau penggunaannya sangat terbatas pada areal pertanian yang dikelola oleh pemerintah. Selain itu, area anomali radioaktivitas pada umumnya bukan merupakan lahan pertanian.

Hal ini menggugurkan hipotesis tentang sumber anomali uranium dari pupuk.

Pengukuran kadar ekuivalen unsur uranium (U), thorium (Th) dan potassium (K) pada tanah menggunakan detektor RS 125. Berdasarkan hasil pengukuran pada seluruh daerah lintasan pengamatan dihasilkan peta sebaran kadar U, Th, dan K (Gambar 11, 12, dan 13), dan kisaran nilai kadar ekuivalen dari masing-masing unsur U, Th, dan K seperti terlihat pada Tabel 1.

Dari hasil pengukuran pada tanah dan batuan diketahui bahwa penyebaran lokasi anomali kadar U terdapat di Biak Timur bagian selatan yaitu di daerah Darmapis, daerah antara Maryendi–Susefi, dan Denafi (lahan BBU). Tanah hasil pelapukan batugamping mempunyai sebaran setempat-setempat menempati topografi lembah antar bukit dengan pola sebaran tidak beraturan, ketebalan teramati berkisar antara 0,15 cm hingga 1 m. Berdasarkan hasil pengamatan diketahui bahwa anomali radioaktivitas maupun kadar unsur U dan Th secara umum dicirikan oleh material lempung-pasiran berwarna coklat kemerahan-kehitaman, lepas-lepas, dengan sebaran setempat-setempat pada morfologi rendah. Kondisi tanah halus yang tersusun oleh material lempung

berwarna merah kehitaman merupakan koloid, sehingga merupakan perangkap yang pencerminan kandungan unsur besi (Fe) efektif untuk terjadinya peningkatan kadar U. tinggi yang bersifat *adsorber* U mobil dalam

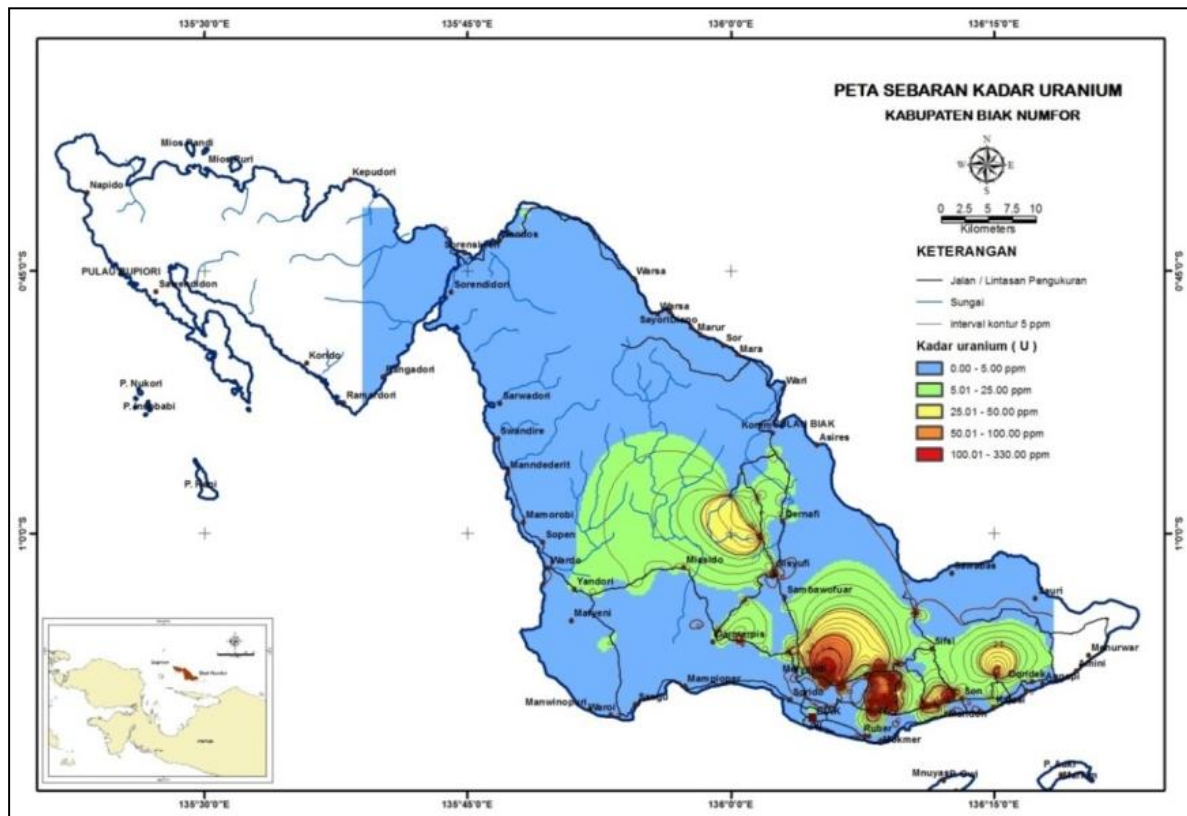


Gambar 9. Peta laju dosis radiasi lingkungan.

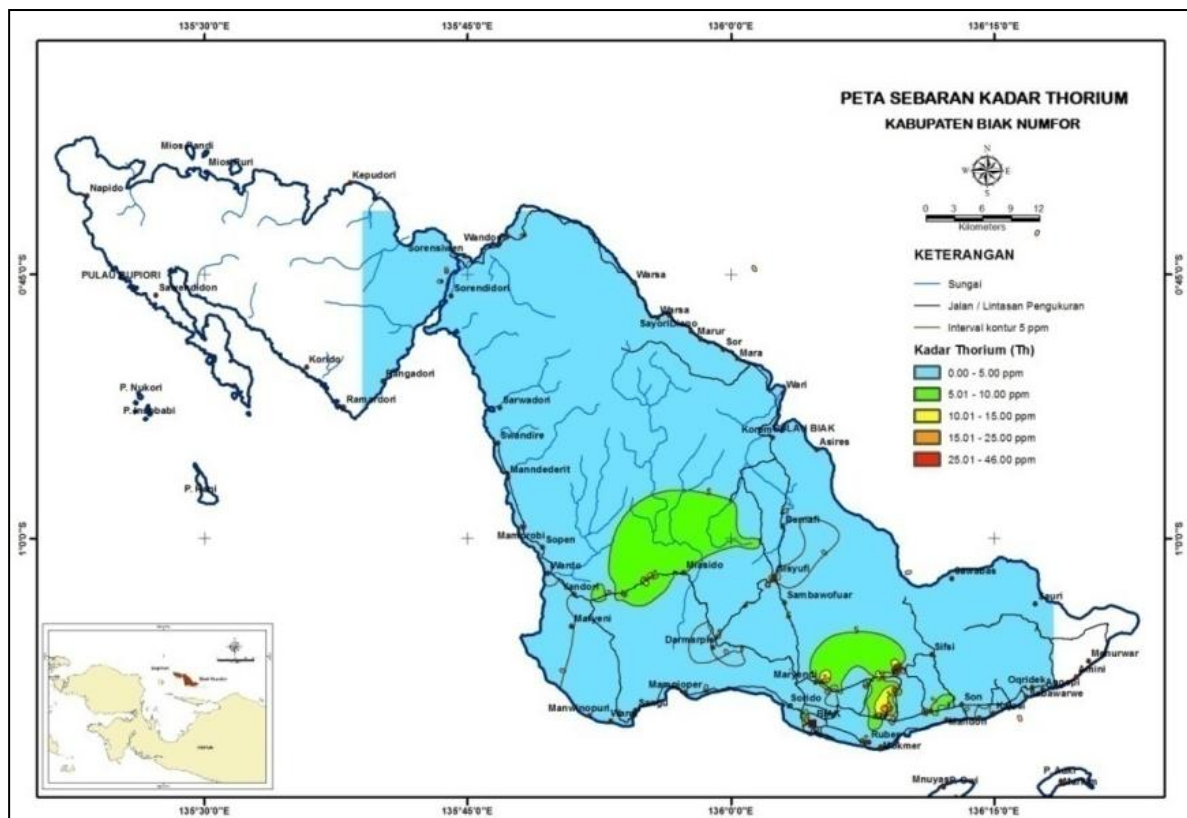


Gambar 10. Pembuatan tes pit soil sampai batuan dasar dan pengukuran radiometri tanah dengan ketebalan 75 cm di atas batuan dasar batugamping klastis.

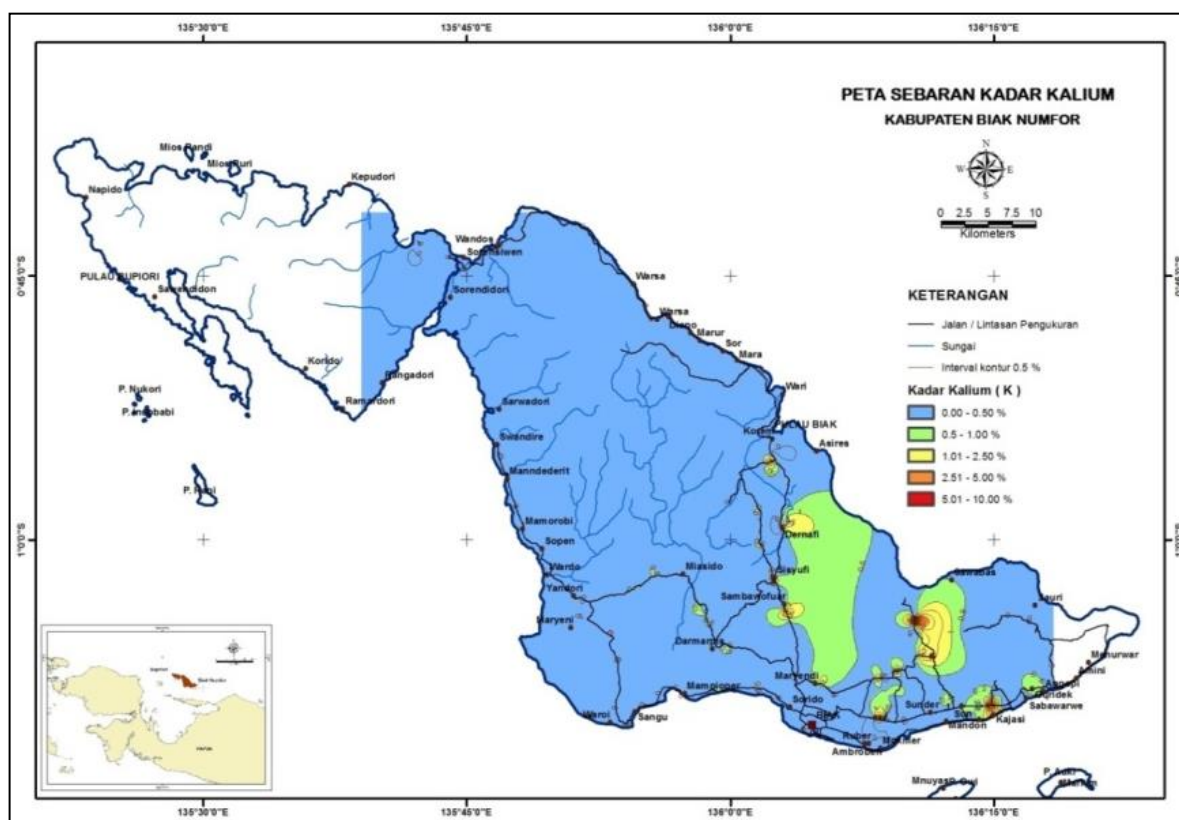




Gambar 11. Peta sebaran kadar uranium.



Gambar 12. Peta sebaran kadar thorium.



Gambar 13. Peta sebaran kadar kalium.

Tabel 1. Kisaran Nilai Kadar dari Masing-Masing Unsur K, U, dan Th

Unsur	Kadar	
	Nilai Terendah	Nilai Tertinggi
K	0,00 %	15,6 %
U	0,00 ppm U	580,00 ppm U
Th	0,00 ppm Th	53,10 ppm Th

### Analisis Sebaran dan Pengkayaan U

Berdasarkan hasil pengamatan di daerah lintasan dan pengukuran secara detil di daerah Maryendi diketahui bahwa keberadaan U berkadar relatif tinggi (tertinggi 438,8 ppm eU, rerata 113,9 ppm eU, terkecil 6,8 ppm eU), U yang terdapat pada tanah telah mengalami pengkayaan sekitar 219 kali daripada kadar normal U pada tanah (0,5 – 2 ppm) dan kadar normal U dalam batugamping (2 – 4 ppm). Sebaran nilai kadar U bernilai relatif tinggi cenderung menempati lembah-lembah antar bukit

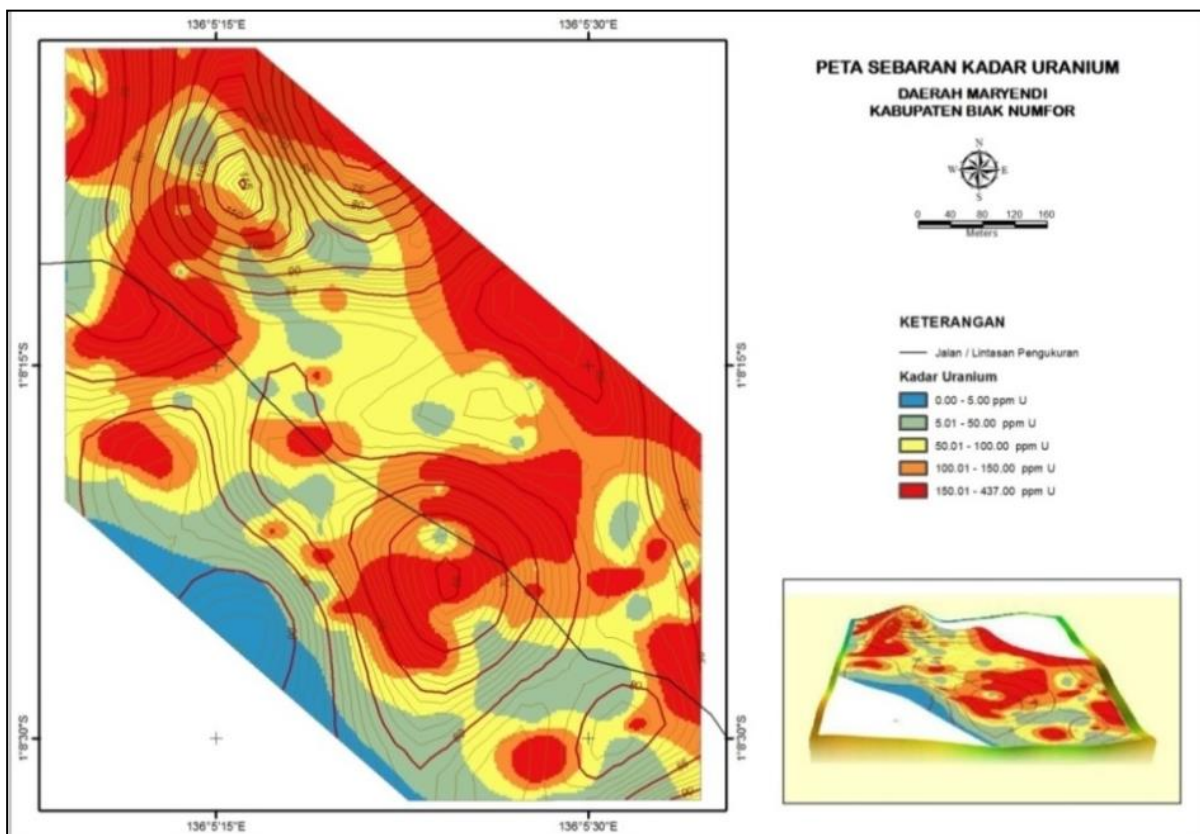
dengan sebaran setempat (Gambar 14 dan 15). Kondisi tersebut terlihat dari hasil analisis regresi linier U-Th (Gambar 16). Pada gambar tersebut terlihat bahwa kandungan U pada tanah memperlihatkan hubungan linier positif (proporsional) dengan kandungan Th dalam tanah. Secara normal uranium yang mempunyai mobilitas relatif tinggi dan Th mempunyai mobilitas rendah<sup>[5]</sup>, dengan menggunakan analisis regresi linier akan menunjukkan hubungan linier negatif, tetapi dari data lapangan menunjukkan

kondisi yang sebaliknya. Hal ini mempunyai arti bahwa kandungan U dalam tanah telah mengalami pengkayaan di permukaan.

Diinterpretasikan bahwa uranium merupakan hasil pelarutan dan pengendapan dari batugamping di sekitarnya.



Gambar 14. Lokasi anomali kadar U menempati lembah bukit.

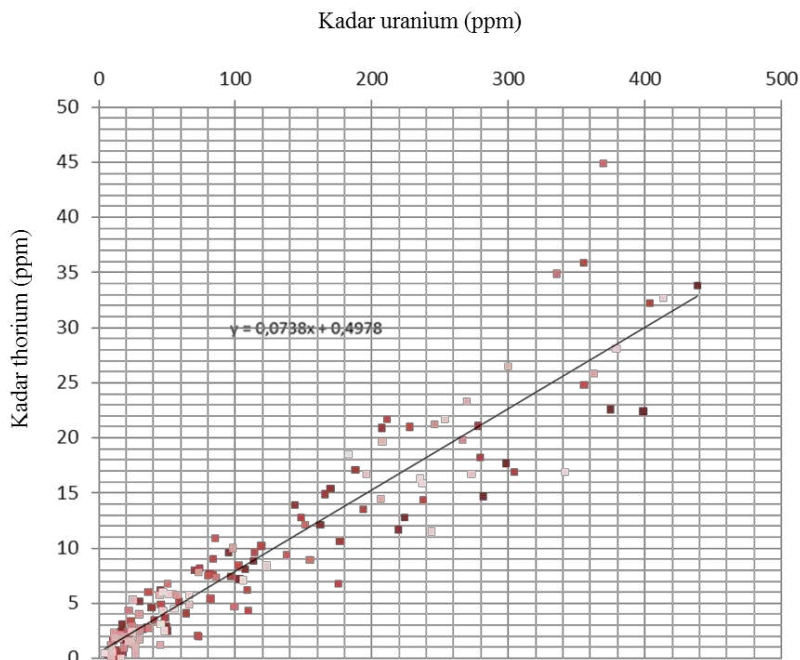


Gambar 15. Peta sebaran kadar uranium daerah Maryendi.

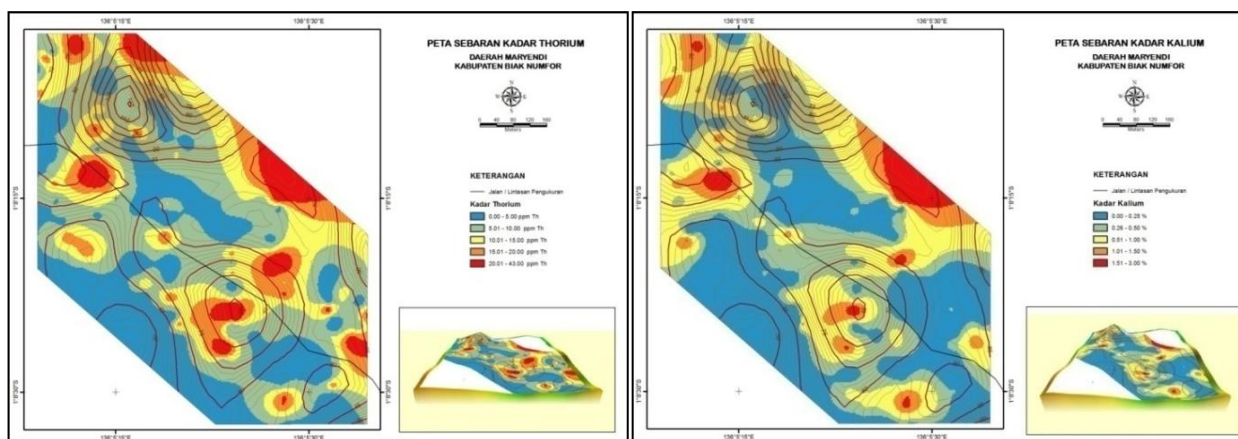
Kadar K di area anomali U secara umum menunjukkan sebaran setempat-setempat dengan kadar rerata relatif rendah (0,4 %) dan tertinggi 2,8 % (Gambar 17), tingginya radiasi sinar gamma di area anomali bukan disebabkan oleh K namun sebagai akibat dari keberadaan U yang relatif tinggi.

Kondisi tersebut juga terlihat dari analisis regresi linier yang memperlihatkan hubungan proporsional U-Dosis linier positif. Berdasarkan kombinasi dari ketiga jenis data tersebut dan dengan mempertimbangkan aspek geologi, diinterpretasikan batas (sebaran) delineasi daerah potensi

mengandung bahan galian U. Daerah anomali dan kadar Th, yaitu di lokasi Sisyufi dan diinterpretasikan pada lokasi delineasi yang Maryendi. bertampalan antara kadar U, laju dosis radiasi



Gambar16. Diagram korelasi U-Th dalam tanah.



Gambar 17. Peta sebaran kadar thorium (kiri) dan kadar K (kanan) daerah Maryendi.

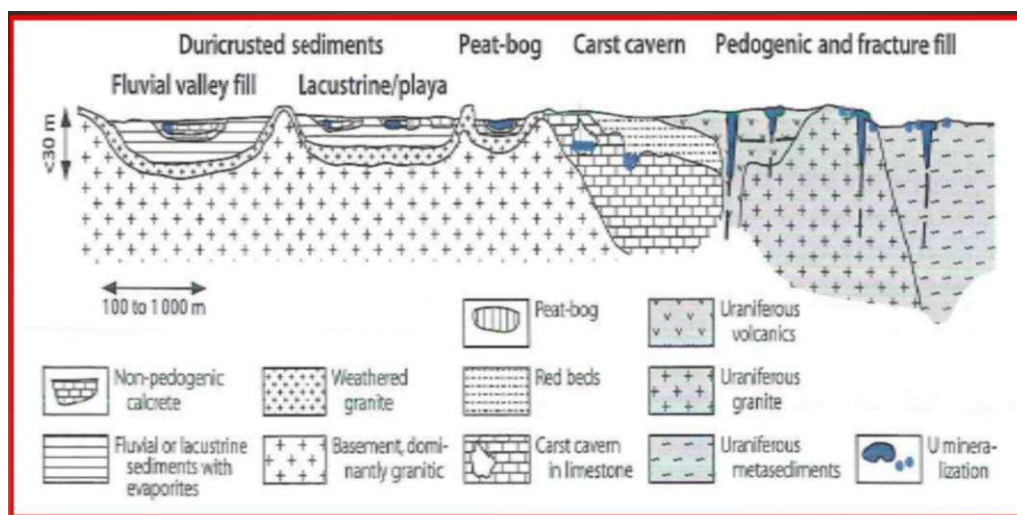
### Model Pengendapan U

Keberadaan anomali U pada tanah berkadar 20,27 – 325,00 ppm eU merupakan hasil pelarutan (*leaching*) dan akumulasi mineral U dari batuan sumber lebih tua yang saat ini diperkirakan adalah batugamping yang termanifestasi di sekitar *Back Reef Zone*, dengan kadar U batugamping relatif

tinggi (230 ppm eU), kandungan normal U dalam batugamping 2 – 4,00 ppm. Pemetaan dan pengukuran radiometri pada batuan basal Formasi Auwea menunjukkan kadar uranium yang sangat kecil yaitu hanya sekitar 1 – 2 ppm eU, dan tidak terlihat adanya pengkayaan di daerah sekitar batuan tersebut.

Berdasarkan karakteristik di atas diinterpretasikan bahwa deposit uranium tersebut dapat diklasifikasikan dalam endapan uranium tipe permukaan (*surficial*)<sup>[7]</sup>. Endapan uranium tipe permukaan

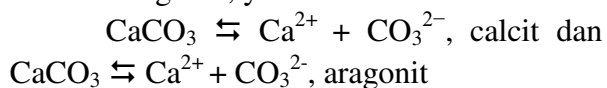
didefinisikan sebagai endapan U berumur muda (Tersier – saat ini), dimana uranium terkonsentrasi dekat permukaan dalam sedimen atau tanah yang belum mengalami kompaksi.



Gambar 18. Model genetik endapan U tipe permukaan<sup>[7]</sup>.

Model genetik pengkayaan U dalam batugamping di lingkungan laut lebih dikontrol oleh faktor biologi daripada faktor pengendapan kimia<sup>[8]</sup>. Pada kondisi ini biasanya terbentuk sebagai uranil karbonat yang terdeposit di daerah dengan kondisi perubahan iklim kering-basah yang sangat cepat seperti di Biak.

Kondisi hidrologi lingkungan batugamping mengandung ion  $\text{CO}_3^{2-}$  yang berasal dari dekomposisi akibat kesetimbangan<sup>[9]</sup>, yaitu:



Konsentrasi ion  $\text{CO}_3^{2-}$ , menyebabkan kondisi di lingkungan batugamping U lebih sulit larut<sup>[10]</sup>, sehingga akan terjadi peningkatan konsentrasi U (pengkayaan) sebagai mineral sekunder berupa uranil karbonat yang biasanya terdapat bentuk mineral<sup>[11]</sup>:

- *Wyartite*  $\text{Ca}_3\text{U}(\text{UO}_2)_6(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_{16} \cdot 3-5\text{H}_2\text{O}$ ,

- *Joliotite*  $(\text{UO}_2)(\text{CO}_3) \cdot 1-5\text{H}_2\text{O}$ ,
- *Rutherfordin*  $(\text{UO}_2)(\text{CO}_3)$ ,
- *Sharpite*  $(\text{UO}_2)(\text{CO}_3) \cdot \text{H}_2\text{O}$

Bagian permukaan batugamping Formasi Mokmer tersebut cenderung mengalami pelapukan dan erosi. Larutan yang mengandung U yang berasal dari batugamping terendapkan di area yang mempunyai permukaan topografi relatif rendah sehingga U terpresipitasi sebagai uranil karbonat.

### KESIMPULAN

Daerah penelitian merupakan morfologi dataran bergelombang rendah yang didominasi oleh endapan batugamping berumur Tersier-Kwarter. Dari hasil analisis dan evaluasi data survei disimpulkan bahwa di daerah Biak terindikasi adanya anomali uranium pada tanah permukaan batugamping Formasi Mokmer yang sifatnya setempat-

setempat di daerah sekitar Maryendi, Darmapis, dan Denafi.

Zona anomali dicirikan oleh keberadaan tanah berwarna coklat tua - coklat kemerahan, dengan nilai dosis radiasi 1,9 sampai 4.032,3 nSv/jam dan kadar U 20,27 – 325 eUppm, secara geologi menempati lembah-lembah dan cekungan topografi lokal pada permukaan batugamping Formasi Mokmer (Qm), berumur Kwartar.

Pengkayaan U di permukaan merupakan pengendapan uranil karbonat yang berasal dari batugamping yang dapat diklasifikasikan sebagai endapan uranium tipe permukaan (*surficial uranium deposit*) dengan sub-tipe tanah (*soil*). Keberadaannya anomali ini dikontrol oleh faktor kesetimbangan hidrologi di lingkungan batugamping ( $\text{CaCO}_3 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + \text{CO}_3^{2-}$ ), dimana U berasal dari hasil pelapukan batugamping yang mengalami pelarutan, transportasi, dan terpresipitasi di tanah permukaan batugamping membentuk kompleks uranil karbonat  $(\text{UO}_2)(\text{CO}_3) \cdot \text{H}_2\text{O}$ . Hasil penelitian pada pupuk yang digunakan untuk tanaman dan batuan basal Formasi Auwea tidak menunjukkan kadar anomali yang dapat mengindikasikan batuan tersebut bertindak sebagai batuan sumber uranium.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR) - BATAN, "Pemetaan Laju Dosis Radiasi Lingkungan di Daerah Biak Numfor", Laporan Internal PTKMR-BATAN, 2012.
2. HILLS, R.R. and MULLER, "Evolution and Dynamic of the Australian Plate", Geological Society Australian, Vol 22, 2003.
3. MASRIA, M., RATMAN, N., dan SUWITODIRDJO, K., "Peta Geologi Lembar Biak", Skala 1:250.000, Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, 1981.
4. JAMES, N.O. and WALKERER G., "Reefs in Facies Models", Geological Association of Canada, Department of Earth Sciences Memorial University of Newfoundland St. John's, Newfoundland, p. 229-244, 1984.
5. MICLE D.G. and MATWES G.W., "Geological Characteristic of Enviroment for Favourable Uranium Deposits", US Department of Energy, Nov. 1978.
6. DE VIVO, B., "Uranium Geochemistry, Mineralogy, Geology, Exploration and Resources", The Institution of Mining and Metallurgy, Portland Place London, England, 1984.
7. IAEA, "Exploitation of Different Type for U Deposits", International Atomic Energy Agency, Vienna, IAEA Tecdoc, 2000.
8. WEVIER, J.J.R., and ADAM, J.A., "Thorium and Uranium", Hand Book of Geochemistry, Wede Pohl, Berlin Springer, 1978.
9. MC SWEEN, H.Y., UHLE, M.E., and STEVEN, M. "Geochemistry Pathways and Processes", Columbia University Press - Second Edition, New York, 2003
10. RAKLEY, R.I., "Environment of Wyoming Tertiary Uranium Deposits", Mountain Geology Publication No. 2, 1972.
11. FRONDEL C., "Systematic Mineralogy of Uranium and Thorium", US Geology Survey, 1958.