

## KESEIMBANGAN RADIOAKTIF SERI URANIUM-238 PADA BEBERAPA SAMPEL DARI KALAN MENGGUNAKAN SPEKTROMETER $\alpha$ DAN $\gamma$

Johan Baratha

Pusat Pengembangan Bahan Galian Nuklir - Badan Tenaga Atom Nasional

### ABSTRAK

KESEIMBANGAN RADIOAKTIF SERI URANIUM-238 PADA BEBERAPA SAMPEL DARI KALAN MENGGUNAKAN SPEKTROMETER  $\alpha$  DAN  $\gamma$ . Telah dilakukan penelitian mengenai keseimbangan radioaktif U-238 terhadap turunannya pada beberapa sampel dari Kalan Kalimantan Barat menggunakan spektrometer  $\alpha$  dan spektrometer  $\gamma$ . Penelitian dilakukan untuk mendapatkan informasi rinci mengenai keseimbangan radioaktif, penyebab ketidakseimbangan, dan faktor koreksi ketidakseimbangan. Keseimbangan radioaktif itu ditentukan berdasarkan pengukuran aktifitas  $\alpha$  dan U-238, U-234, dan Th-230 serta pengukuran aktifitas  $\gamma$  dari Th-234, Pb-214, Bi-214, dan Pb-210. Sebagai pembandingan dan membantu interpretasi juga ditentukan kadar uranium berdasarkan pengukuran total  $\beta$  dan total  $\gamma$ . Hasil analisis data menunjukkan bahwa umur keberadaan uranium pada daerah studi telah lebih dari satu juta tahun dan keseimbangan radioaktif yang telah tercapai terganggu kemudian oleh adanya migrasi uranium dan radium. Akibat migrasi tersebut terjadi pemisahan dan pengkayaan uranium pada batuan bijih, sehingga perlu dilakukan koreksi hasil pengukuran radiometri  $\gamma$  pada daerah tercakup.

### ABSTRACT

RADIOACTIVITY U-238 SERIES DISEQUILIBRIUM ON SEVERAL SAMPLES FROM KALAN USING ALPHA AND  $\gamma$  SPECTROMETERS. A research of the radioactivity disequilibrium between U-238 and its daughter on several samples from Kalan, West Kalimantan has been carried out. The purpose of the research is to find out the detail information about the radioactivity equilibrium, the cause of, and disequilibrium correction factor. The radioactivity disequilibrium was determined based on the measurements of  $\alpha$  activity of U-238, U-234, and Th-230, and  $\gamma$  activity measurement from Th-234, Pb-214, Bi-214 and Pb-210. In order to gain a good interpretation and comparison, uranium content was also determined based on their total  $\gamma$  and total  $\beta$  activities measurement. The results of data analysis indicates that the age of uranium formation in the study area is more than one million years and the radioactivity equilibrium which has been achieved was disturbed later on by the migration of uranium and radium. This migration has been a cause of the addition and the subtraction of initial uranium content in the rock, and as the matter of fact some correction factor should be considered to the  $\gamma$  radiometry measurement in the covered area.

### PENDAHULUAN

Ketidakseimbangan radioaktif U-238 terhadap turunannya dapat dijumpai pada umur permineralan yang muda atau kurang dari satu juta tahun, atau dapat juga terjadi pada umur permineralan yang lebih dari satu juta tahun tetapi mempunyai kondisi geologi yang mendukung terjadinya pemisahan U-238 dengan turunannya seperti pada sesar, kekar, rekahan atau gejala geologi lain.

Pada pekerjaan eksplorasi maupun pekerjaan evaluasi anomali radiometri dilakukan berdasarkan pengukuran  $\gamma$  yang sebagian besar diemisi oleh anak luruh U-238. Dalam ketidakseimbangan radioaktif U-238 dengan turunan-

nya nilai pengukuran tidak akurat sehingga menyebabkan anomali semu.

Menurut Ivanovich dan Harmon [1], U-238, U-234, Th-230 dan Ra-226 mempunyai sifat mudah larut dan mobilitas yang berbeda, hal ini memberi peluang terjadi pemisahan radiounsur pada lingkungan geologi tersebut di atas dan mengakibatkan terjadi ketidakseimbangan radioaktif.

Untuk menentukan rasio ketidakseimbangan, dilakukan pengukuran radioaktivitas menggunakan spektrometer  $\alpha$  dan  $\gamma$  pada masing-masing radiounsur U-238, U-234, Th-234, Th-230, Pb-214, Bi-214, dan Pb-210.

Karena keterbatasan (PNC-JEPANG), dari 120 sampel yang dipersiapkan hanya 10 sampel yang dapat dianalisis menggunakan penganalisa saluran ganda spektrometer  $\alpha$  dan spektrometer  $\gamma$ , serta 50 sampel dianalisis menggunakan pencacah jumlah  $\beta$  dan jumlah  $\gamma$ .

Penelitian ini bertujuan mendapatkan informasi lebih rinci mengenai ketidakeseimbangan radioaktif, penyebab ketidakseimbangan, dan faktor koreksi ketidakseimbangan.

Hasil penelitian dapat digunakan sebagai koreksi dan referensi dalam pengembangan pekerjaan eksplorasi dan evaluasi pada daerah tercahup.

### TEORI

Berdasarkan tetapan peluruhan dari masing-masing radiounsur dalam seri U-238 (Tabel 1) maka radiounsur U-238 akan mencapai keseimbangan radiaktivitas dengan seluruh anak luruhnya dalam waktu sekitar 1 juta tahun, dalam keadaan ini besar aktivitas setiap radiounsur akan sama, sehingga pada saat sebuah atom U-238 luruh maka pada saat yang sama sebuah atom Pb-206 akan terbentuk. Dua hal penting penyebab terjadi ketidakseimbangan radioaktif yaitu:

1. Umur formasi atau keberadaan uranium kurang dari 1 juta tahun, sehingga belum mencapai keseimbangan dicirikan oleh rasio U-234/U-238 kurang dari 1.
2. Proses kimia atau fisika di alam dapat menyebabkan satu atau lebih radiounsur terpisah dari seri U-238.

Menurut teori disintegrasi Rutherford dan Soddy [1],  $-dN/dt = N\lambda =$  aktivitas.  $-dN/dt$  adalah laju berkurang jumlah atom  $N$  sebagai fungsi dari waktu  $t$ , sama dengan perkalian dari jumlah atom  $N$  dengan tetapan peluruhan  $\lambda$  yang juga disebut sebagai aktivitas.

Bila aktivitas induk  $N_1 \lambda_1$ , dan aktivitas anak  $N_2 \lambda_2$ , maka rasio aktivitas anak terhadap induknya pada kondisi awal  $N_2 = 0$  dan pada waktu  $t = 0$ , adalah ;

$$N_2 \cdot \lambda_2 / N_1 \cdot \lambda_1 = \left\{ \lambda_2 / (\lambda_2 - \lambda_1) \right\} \left\{ 1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t} \right\} \quad (1)$$

Bila tetapan peluruhan induk jauh lebih kecil dari tetapan peluruhan turunannya maka aktivitas induk secara terukur tidak menurun selama masa paruh turunannya, dan suatu saat aktivitas induk akan sama dengan aktivitas turunannya, hal ini dikenal sebagai keseimbangan sekuler. Pada keseimbangan sekuler

rasio aktivitas anak terhadap aktivitas induknya adalah ;

$$N_2 \cdot \lambda_2 / N_1 \cdot \lambda_1 = 1 - e^{-\lambda_2 \cdot t} \quad (2)$$

Pada waktu  $t$  jauh lebih besar dari waktu paruh anak luruhnya maka  $N_2 \cdot \lambda_2 = N_1 \cdot \lambda_1$ , atau  $N_2 \cdot \lambda_2 / N_1 \cdot \lambda_1 = 1$ ,

Dalam keseimbangan sekuler, aktivitas induk sama dengan aktivitas turunannya:

$$N_1 \cdot \lambda_1 = N_2 \cdot \lambda_2 = N_3 \cdot \lambda_3 = \dots = N_n \cdot \lambda_n \quad (3)$$

Unsur mineralisasi atau waktu migrasi uranium dapat ditentukan melalui persamaan 4, [1]:

$$\frac{Th-230}{U-234} = \left( \frac{1 - e^{-\lambda_{230}t}}{\lambda_{230} - \lambda_{234}} \right) + \left( 1 - \frac{1}{U-234/U-238} \right) \left( \frac{\lambda_{230}}{\lambda_{230} - \lambda_{234}} \right) \left( 1 - e^{(\lambda_{230} - \lambda_{234})t} \right) \quad (4)$$

Tabel 1. Seri peluruhan uranium-238

Simbol	Radiasi	Waktu paruh
U-238		4,468 milyar tahun
↓	$\alpha$	
Th-234		24,1 hari
↓	$\beta, \gamma$	
Pa-234		1,18 menit
↓	$\beta$	6,7 jam
U-234		248.000 tahun
↓	$\alpha$	
Th-230		75.200 tahun
↓	$\alpha$	
Ra-226		1602 tahun
↓	$\alpha$	
Rn-222		3,825 hari
↓	$\alpha$	
Po-218		3,05 menit
↓	$\alpha$	
Pb-214		26,8 menit
↓	$\beta, \gamma$	
Bi-214		19,7 menit
↓	$\beta, \gamma$	
Po-214		1,64/10.000 detik
↓	$\alpha$	
Pb-210		22 tahun
↓	$\beta$	
Bi-210		5,02 hari
↓	$\beta$	
Po-210		138,3 hari
↓	$\alpha$	
Pb-206		stabil

## METODE DAN TATA KERJA

### Preparasi Sampel :

Sampel berupa batuan (metalanau dan metapelit skistosan), diambil dari beberapa lokasi yaitu Lembah hitam, Rabau, Lemajung, Tanah Merah, Rirang dan Eko-Remaja. Untuk keperluan analisis kimia, sampel dihancurkan sampai ukuran 200 mesh.

Pada pengukuran aktivitas  $\gamma$ , berat sampel 20 gram ditaruh di tabung aluminium tertutup, sebelum dilakukan pengukuran  $\gamma$ , sampel ditiadakan 2 minggu untuk menghilangkan gangguan ketidakseimbangan yang disebabkan oleh hilangnya radon selama preparasi sampel.

Untuk pengukuran aktivitas  $\alpha$ , berat sampel 0,1 s/d 1,0 gram dimasukkan ke dalam *crusible* selanjutnya dilakukan pemisahan secara kimia.

### Pemisahan secara kimia:

Energi  $\alpha$  dari U-234 dan Th-230 hampir sama sehingga  $\alpha$  spektrometer-MCA tak dapat membedakannya secara tegas, maka sebelum pengukuran radioaktivitas kedua unsur tersebut harus dipisahkan. Pemisahan dilakukan secara kimia menggunakan metode *solvent extraction* untuk mengekstraksi uranium dan metode *anion exchange* untuk disolusi thorium.

### Pengukuran Aktivitas nuklida:

- kalibrasi detektor, menggunakan standar sampel Am-241 untuk  $\alpha$  dan standar IAEA U-238 untuk aktivitas  $\gamma$ .
- kalibrasi *spike tracer*, hanya untuk  $\alpha$
- pengukuran harga latar (background)
- pengukuran aktivitas sampel

### Spektrometri $\alpha$ :

*Gold Surface Barrier Detector*, digunakan untuk mengukur aktivitas  $\alpha$  : U-238, U-234, U-232, Th-232, Th-230 dan Th-228 dari total 10 sampel dengan waktu cacah 20 jam/sampel. Kalibrasi detektor dilakukan untuk menghitung efisiensi cacah dan resolusi detektor (kemampuan detektor memisahkan garis perbedaan energi). Efisiensi detektor adalah rata-rata 30% dengan resolusi 1,1% dihitung menggunakan persamaan :

$$\text{Efisiensi cacah} = \frac{\text{aktivitas terukur standar}}{\text{aktivitas sebenarnya standar}} \times 100 \% \quad (5)$$

$$\text{Resolusi detektor} = \frac{\text{FWHM} \times (\delta \text{ energi} / \delta \text{ channel})}{\text{energi}} \times 100 \% \quad (6)$$

### Spektrometri $\gamma$

*Intrinsic Germanium Coaxial Detector* digunakan untuk mengukur aktivitas  $\gamma$ ; Pb-210, Pb-214, Bi-214, dan Th-234 dari jumlah 50 sampel dengan waktu cacah 83 menit/sampel.

Energi, FWHM (Full line Width Half Maximum), efisiensi dihitung menggunakan metode kwadrat terkecil dengan persamaan:

$$\text{Energi (Kev)} = C0 + C1 \times \text{channel} + C2 \times \text{channel}^2$$

$$\text{FWHM (Kev)} = C3 + C4 \times \sqrt{\text{energi}}$$

log efisiensi =

$$C0 + C1 \times \log(\text{energi}) + C2 \times \log(\text{energi})^2$$

Jika log efisiensi  $\geq$  knee, maka menggunakan persamaan, log efisiensi =  $C3 + C4 \times \log(\text{energi})$   
knee = 270 Kev, ditentukan berdasarkan *trial and error*.

C0, C1, C2, C3, dan C4 adalah konstanta persamaan regresi pada metode kuadrat terkecil.

### Perhitungan rasio aktivitas Th-230/U-234

Rasio aktivitas U-234/U-238 dan Th-230/Th-232 dapat dihitung secara langsung dari spektrum (pada pekerjaan ini Th-232 tak terdeteksi), tetapi rasio Th-230/U-234 harus dikoreksi karena datang dari spektrum yang berbeda.

Rasio aktivitas Th-230/U-234 sebenarnya adalah:

$$\left[ \frac{\text{Th-230}}{\text{U-234}} \right]_{\text{true}} = \left[ \frac{\text{Th-230}}{\text{U-234}} \right]_{\text{M}} \left[ \frac{\text{U-292}}{\text{U-228}} \right]_{\text{M}} \left[ \frac{\text{Th-228}}{\text{U-232}} \right]_{\text{S}}$$

True : aktivitas sebenarnya

M : aktivitas terukur

S : aktivitas *spike tracer*

### Statistik olah data

Jika peluang kejadian adalah kecil dan jumlah observasi besar maka distribusi Poisson adalah metode terbaik digunakan [2].

Pada distribusi Poisson, varian = nilai rata-rata  $m$  dan simpangan bakunya, atau *error* =  $\sqrt{m}$ , jika cacah sampel  $P_s$ , dan waktu cacah  $T_s$ , maka *error* =  $\sqrt{P_s} / T_s$

Jika cacah latar  $P_b$ , dan waktu cacah latar  $T_b$ , maka nilai cacah bersih =  $\frac{P_s}{T_s} - \frac{P_b}{T_b}$

$$\text{Error cacah bersih} = \sqrt{\frac{P_s}{T_s^2} + \frac{P_b}{T_b^2}}$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengukuran aktivitas  $\alpha$  pada seluruh sampel yang dianalisis menggunakan spektrometer  $\alpha$  yaitu :

2 sampel dari Lemajung (No.04 TRK 52 singkapan permukaan dan No. 40 inti bor), 3 sampel dari singkapan terowongan Remaja (no.12 dari BM 184, no.23 dari BM 126, dan no.26 dari BM 179), 2 sampel dari bongkah permukaan Rirang (no. 41 dan no. 46), 1 sampel dari PC-15 (no. 09, inti bor), 1 sampel dari Rabau (no. 36, inti bor), dan 1 sampel dari Lembah Hitam (no.24, inti bor), menunjukkan bahwa :

a. Rasio aktivitas U-234/ U-238 relatif mempunyai nilai 1 (Tabel 2), atau U-234 dalam keseimbangan radioaktif dengan U-238. Oleh karena untuk mencapai suatu keseimbangan antara U-238 dibutuhkan waktu paling sedikit 1 juta tahun maka dengan demikian dapat dinyatakan bahwa umur keberadaan bijih uranium pada sampel tersebut telah lebih dari satu juta tahun.

60% pada sampel no.12 BM 184 Remaja, dan 74% pada sampel no.41 Rirang (persen dihitung dari kadar sampel sekarang), atau bila dihitung dari kadar awal sebelum terjadi migrasi maka terjadi penurunan kadar; 36%, 37%, dan 42% berturut-turut untuk sampel No.4 Lemajung, no.12 BM 184, dan no.41 Rirang. U-238 pada sampel telah mencapai keseimbangan sekuler tentunya seluruh anak luruh U-238 mempunyai nilai aktivitas yang sama besar bila tidak mengalami gangguan kimia/fisik yang memisahkan unsur anak luruh tersebut. Demikian juga Th-234 dan Th-230 mempunyai sifat kimia yang relatif sama terhadap kelarutan sehingga dapat diasumsikan bahwa aktivitas Th-234 sama dengan aktivitas Th-230.

Tabel 2. Nilai rasio U-234/U-238, Th-230/U-234, dan Ra-226/Th-230

No. Sampel	$\frac{U-234}{U-238}$	$\frac{Th-230}{U-234}$	$\frac{Ra-226}{Th-230}$	Kadar ppm U	Keterangan
04. Lemajung	0.98	1.60	0.77	1840	TRK 52 P
40. Lemajung	0.98	0.91	1.07	5847	Inti bor
09. PC 15	1.00	0.99	1.04	775	Inti bor
26. BM 179	0.99	0.92	1.01	15778	DT
12. BM 184	0.99	1.60	0.64	15493	DT
23. BM 126	0.99	0.99	1.02	8347	DT
24. L. Hitam	0.99	0.91	1.06	6635	Inti bor
36. Rabau	1.04	0.84	1.09	5970	Inti bor
41. Rirang	0.99	1.76	0.47	5335	BP
46. Rirang	0.99	Error	Error	35059	BP

**Keterangan:**

P= permukaan; DT = dinding terowongan; BP = Bongkah permukaan

b. Pada sampel : no. 04 Lemajung, no. 12 BM 184, dan sampel no. 41 Rirang (Tabel 2), rasio Th-230/U-234 dan rasio Th-230/U-238 menunjukkan nilai lebih besar dari 1 (Tabel 2) atau konsentrasi Th-230 lebih besar dari U-234 dan U-238.

Pada setiap kondisi umumnya uranium lebih mudah larut daripada unsur thorium [1], maka berdasarkan kemudahan larut dapat diinterpretasikan bahwa pada lokasi sampel tersebut telah terjadi gangguan kimia/fisik yang menyebabkan migrasi atau pelepasan unsur uranium dari formasi yang sebelumnya telah mencapai keseimbangan radioaktif (Rasio U-234/U-238 adalah 1), sehingga menyebabkan penurunan kadar uranium. Uranium yang lepas yaitu sama atau lebih dari; 57% pada sampel No. 04 Lema-

Jung. Dengan asumsi tersebut waktu terjadinya migrasi uranium dapat dihitung dengan menerapkan persamaan 2, berdasarkan nilai rasio U-234/Th-234.

Hasil perhitungan menunjukkan migrasi uranium terjadi sekitar :

352.822 tahun lalu pada sampel No.04 Lemajung

352.151 tahun lalu pada sampel no.12 BM 184 Remaja

303.151 tahun lalu pada sampel No.41 Rirang

(hasil pengukuran aktivitas Th-234 dan Pb-210 tidak digunakan karena tidak akurat). Pada sampel-sampel tersebut (No.04, No. 12, No.41) rasio Ra-226/Th-230 lebih kecil dari 1 (Tabel 2), hal ini menunjukkan larutnya Ra-226 dari seri U-238, peristiwa

tersebut terakhir terjadi sekitar:

3.426 tahun lalu pada sampel 0.4 Lemajung  
2.351 tahun lalu pada sampel 12 BM 184 Remaja

1.480 tahun lalu pada sampel 41 Rirang

- c. Sampel No.24 Lembah Hitam, sampel no.26 BM 179 (Terowongan), sampel No.36 Rabau, dan sampel No.40 Lemajung, rasio U-234/U-238 bernilai relatif 1 (lihat Tabel 2, kolom 2 dan 3). Bila rasio U-234/U-238 bernilai 1 makaseharusnya seluruh anak luruh U-238 mempunyai aktivitas yang sama besar karena telah mencapai keseimbangan sekuler. Aktivitas Th-230 lebih kecil daripada U-234 umumnya disebabkan oleh umur formasi uranium yang kurang dari 1 juta tahun, tetapi karena rasio U-234/U-238 relatif bernilai 1 sehingga keseimbangan sekuler telah tercapai umur uranium sama atau lebih dari 1 juta tahun) maka dalam hal ini lebih cenderung disebabkan oleh tambahan konsentrasi uranium atau pengkayaan uranium. Pengkayaan uranium dapat terjadi oleh migrasi uranium dari tempat lain ke lokasi sampel yang kemudian terserap dan mengakibatkan penambahan/pengkayaan uranium pada sampel, atau pengkayaan terjadi akibat hasil proses geologi lain.

Besar penambahan/pengkayaan uranium adalah ; 8,95% pada sampel No.24 Lembah Hitam, 8.40% pada sampel No.26 BM 179, dan 11,88% pada sampel No.36 Rabau (dihitung berdasarkan perbedaan aktivitas Th-230 dan U-238).

Waktu terjadi migrasi atau pengkayaan dapat dihitung dengan menerapkan Persamaan (3) yaitu sebagai berikut; sampel No.24 Lembah hitam, sekitar 250.000 s/d 260.000 tahun lalu. sampel No.26 BM 179 Remaja, 260.000 s/d 280.000 tahun lalu. Sampel No.36 Rabau, 195.393 s/d 209.314 tahun lalu.

Bila peristiwa pengkayaan uranium terjadi berulang maka yang terhitung adalah peristiwa terakhir.

- d. Uji statistik korelasi linier pada 10 sampel hasil pengukuran spektrometer  $\alpha$  menunjukkan hubungan erat negatif antara nilai rasio Th-230/U-234 dan rasio Ra-226/Th-230 dengan nilai korelasi  $R = -0,97$ . Secara matematis disimpulkan bahwa naik turun nilai U-234 diikuti oleh nilai Ra-226. Karena Ra-226 mempunyai tingkat solubilitas yang lebih tinggi daripada U-234 [1] maka kelarutan U-234 juga akan melarutkan Ra-226.

Dengan demikian uji statistik tersebut mendukung pernyataan pada butir (b) dan (c).

- e. Nilai rasio rata-rata hasil pengukuran spektrometer jumlah  $\gamma$  dibanding pengukuran spektrometer jumlah  $\beta$  yaitu dari seluruh 50 sampel, dengan menerapkan: nilai rata-rata  $X = n \Sigma Tg/Tb$  didapat  $X = 1,40$ ,  $Error = 0,00$ .  $Tg$ , adalah total  $\gamma$  dan  $Tb$  adalah total  $\beta$ , dan  $n = 50$ .

Nilai rasio rata-rata hasil pengukuran total  $\beta$  terhadap nilai  $\alpha$  dari 10 sampel,  $X = 1,04 \pm 0,04$ .

Menurut Robert Brown [2], dalam bijih uranium yang telah mencapai keseimbangan radioaktif 98% dari total sinar  $\gamma$  dan 60% dari total sinar  $\beta$  diemisi oleh anak luruh Ra-226. Sisa 40% dari total sinar  $\beta$  diemisi oleh Th-234 dan Pa-234 yang mempunyai waktu paruh sangat pendek yaitu 24 hari untuk Th-234 dan 1,18 menit untuk Pa-234, sehingga oleh pendeknya masa paruh maka Th-234 dan Pa-234 dapat dikatakan selalu seimbang dengan induknya U-238. Sekalipun terjadi gangguan keseimbangan (pelepasan atau penambahan uranium) maka Th-234 dan Pa-234 segera akan mencapai keseimbangan kembali dengan U-234. Emisi total  $\gamma$  dari anak luruh Ra-226 sangat dipengaruhi oleh 3 radiounsur anak luruh U-238 yang berwaktu-paruh panjang yaitu U-234, 250.000 tahun, Th-230 75.000 tahun, dan Ra-226 1602 tahun, sehingga dibutuhkan waktu lama untuk mencapai keseimbangan yang terganggu. Demikian juga Ra-226 mempunyai tingkat solubilitas yang tinggi sehingga memberi peluang kejadian ketidakseimbangan untuk anak luruhnya yang dominan mengemisi sinar  $\gamma$ . Berdasarkan hal tersebut maka hasil pengukuran total  $\beta$  lebih akurat daripada total  $\gamma$ .

Karena detektor lapangan umumnya menggunakan total  $\gamma$ , maka perlu dilakukan koreksi hasil pengukuran  $\gamma$  di lapangan dengan faktor:  $1/1,4 = 0,71$ . Baik hasil pengukuran SPP 2 NF,  $\gamma$  logging atau seluruh detektor yang menggunakan total  $\gamma$ , harus dikalikan dengan faktor 0,71 untuk mendapatkan nilai yang lebih akurat atau mendekati kebenaran.

## KESIMPULAN DAN SARAN

1. Umur permineralan atau keberadaan uranium pada lokasi sampel (Lemajung, PC15, Remaja, Lembah Hitam, Rabau dan Rirang) telah lebih dari 1 juta tahun, ditandai oleh

keseimbangan aktivitas antara U-234 dan U-238 (Tabel 2, kolom 2).

2. Telah terjadi migrasi (perpindahan) uranium yang mengakibatkan adanya pengkayaan dan pemiskinan uranium (penurunan kadar). Dengan asumsi sampel mewakili tempat pengambilan maka migrasi pemiskinan uranium telah terjadi sebesar:  
36% di Lemajung (permukaan), sekitar 352.822 tahun lalu, 37% di Remaja (BM 184) sekitar 352.151 tahun lalu, 42% pada *boulder* Rirang sekitar 303.151 tahun lalu. Migrasi pengkayaan uranium telah terjadi sebesar: 8,95% di Lembah Hitam sekitar 260.000 tahun lalu, 8,40% pada BM 179 Remaja sekitar 270.000 tahun lalu, 11,88% di Rabau sekitar 200.000 tahun lalu, 11,35% di Lemajung (bawah permukaan) sekitar 266.000 tahun lalu.

Catatan : persen pengkayaan dan pemiskinan uranium dihitung dari kadar awal sebelum terjadinya proses.

3. Migrasi pemiskinan cenderung terjadi dalam suatu periode waktu yang relatif sama pada daerah Lemajung dan Remaja dan terjadi kemudian pada daerah Rirang. Migrasi pengkayaan juga cenderung terjadi dalam suatu periode waktu relatif sama pada daerah Lembah Hitam dan Remaja, dan terjadi kemudian pada daerah Rabau. Proses pengkayaan uranium terjadi akibat adanya proses pemiskinan pada daerah lain, sebagian uranium terserap dan sebagian larut hilang dinyatakan oleh persen pengkayaan lebih kecil dari pada persen pemiskinan.
4. Agar pengukuran konsentrasi/kadar uranium yang didasarkan dari cacah total  $\gamma$  (SPP 2 NF,  $\gamma$  logging dsb.) di daerah Kalan memberikan hasil yang lebih akurat, sangat perlu dilakukan koreksi hasil pengukuran (faktor koreksi disequilibrium) dengan faktor 0,71 yaitu seluruh hasil deteksi  $\gamma$  dikalikan dengan angka 0,71.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Ivanovich, M. and Harmon, R. S., Uranium Series Disequilibrium Application to Environmental Problems, Claredon Press Oxford (1982).
2. Robert Brown et al., The Use of Beta minus Gamma Radiometric Analysis in the Determination of Uranium in Ores and Concentrates.