

## PERHITUNGAN DOSIS GAS RADON YANG TERHISAP OLEH SEORANG PEKERJA UJUNG DEPAN DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR

Soedardjo

Pusat Penelitian Teknologi Keselamatan Reaktor

### ABSTRAK

**PERHITUNGAN DOSIS GAS RADON YANG TERHISAP OLEH SEORANG PEKERJA UJUNG DEPAN DAUR BAHAN BAKAR NUKLIR.** Telah dipelajari perhitungan dosis gas Radon yang terhisap oleh seorang pekerja ujung depan daur bahan bakar nuklir. Ujung depan daur bahan bakar nuklir disini ialah penambangan bijih uranium pada tambang tertutup bawah tanah pada Terowongan Ekplorasi Remaja Kalimantan Barat. Kegiatan penambangan yang dipilih antara lain pengeboran, peledakan bidang mineralisasi, pengangkutan batuan mineralisasi serta penyanggaan terowongan. Diasumsikan dalam sebulan seorang penambang uranium di Terowongan Ekplorasi Remaja Kalimantan Barat mempunyai daur tugas pada 4 daerah kerja, yaitu di Terowongan Silang I, II, III dan IV. Kegiatan untuk pemboran dilakukan selama 12 jam, setelah peledakan dilakukan selama 2 jam, pengangkutan mineral selama 9 jam dan penyanggaan terowongan selama 8 jam. Hasil perhitungan yang diperoleh dari model tersebut ialah, konsentrasi rata-rata gas Radon untuk Terowongan Silang I, II, III dan IV masih di bawah ambang batas 300 pCi/l, dan perkiraan jumlah dosis maksimum setahun yang diserap oleh pekerja tambang uranium tersebut sebesar  $2,3 \times 10^2 \mu\text{Ci}$  dan masih di bawah dosis maksimum yang diijinkan oleh BATAN yaitu  $7,3 \times 10^2 \mu\text{Ci}$ .

### ABSTRACT

**CALCULATION OF RADON GAS INHALED BY A FRONT END WORKER OF THE NUCLEAR FUEL CYCLES.** The calculation of Radon gas inhaled by workers in a front end nuclear fuel cycle has been studied. The cycle of front end nuclear fuel is underground uranium exploration on Remaja tunnel West Kalimantan. The activities of mining consider of drilling, blasting, transporting mineral and tunnel supporting were chosen. It is assumed that in one month, for a worker has four assignments namely in tunnel I, tunnel II, tunnel III and tunnel IV. The activities in the mine are divided into some categories, namely 12 hours of drilling, 2 hours of after blasting, 9 hours of mineral transportation and 8 hours of tunnel support construction. The result of calculation shows that the average Radon gas concentration on each particular location is still less than maximum permissible concentration 300 pCi/l. The prediction of maximum dose inhaled by one uranium miner during a year is  $2.3 \times 10^2 \mu\text{Ci}$  which is less than BATAN regulation  $7.3 \times 10^2 \mu\text{Ci}$ .

### Pendahuluan

Pengukuran dosis gas Radon pada terowongan eksplorasi uranium Remaja Kalimantan Barat untuk seorang pekerja eksplorasi uranium, belum dilakukan secara terpadu, yaitu yang meliputi pengukuran konsentrasi gas radon untuk kegiatan pengeboran, peledakan dan pengangkutan mineral radioaktif serta penyanggaan terowongan penambangan atau eksplorasi uranium. Walaupun namanya terowongan eksplorasi, namun kegiatan di terowongan tersebut dapat dikelaskan kedalam kegiatan penambangan, karena kegiatan tersebut meliputi eksplorasi, pengeboran, peledakan, pengambilan atau transportasi bijih uranium dan penyanggaan terowongan<sup>5</sup>. Biasanya pengukuran gas Radon yang dilakukan pada eksplorasi

uranium di terowongan Remaja Kalimantan Barat yaitu pada saat tidak ada kegiatan penambangan. Maka cara pengukuran tersebut belum mencerminkan konsentrasi gas Radon pada saat kegiatan penambangan yang terpadu atau menyeluruh.

Pengukuran-pengukuran yang menyangkut gas Radon yang pernah dilakukan antara lain: dengan alat LUDLUM 1000 untuk mengukur kecepatan keluarnya (emanate) gas Radon dari lubang bor Long Year (L.Y.) 65<sup>1</sup>, tetapi masih perlu perhitungan lebih lanjut untuk mengetahui konsentrasi gas Radon sebenarnya. Pengukuran kontaminasi interna radium karyawan PFBGN BATAN juga sudah dilakukan dengan detektor Radon elektrostatik model PMT-TEL-Pylon<sup>4</sup>, namun pengukuran kontaminasi interna radium



tersebut juga belum menggambarkan langsung konsentrasi gas Radon pada kegiatan para penambang atau eksplorator uranium yang sesungguhnya.

Untuk itu pada makalah ini akan dibahas masalah yang menyangkut teknologi lingkungan atau proteksi fisik terhadap bahaya radiasi pada kegiatan penambangan bijih uranium, berupa perhitungan dosis gas Radon yang terhisap oleh seorang pekerja ujung depan daur bahan bakar nuklir. Metode yang digunakan ialah, berdasarkan pengalaman empirik yang dilakukan pada tambang uranium bawah tanah di daerah Limoge Perancis, lalu dibuat perhitungan secara teoritik untuk Tambang Eksplorasi Uranium Remaja Kalimantan Barat (TEUR). Sebagai bahan masukan model tersebut ialah peraturan-peraturan pada tambang uranium bawah tanah di daerah Limoge Perancis, yang digabung dengan peraturan-peraturan dari BATAN. Proses model tersebut menggunakan asumsi teoritik dari data kegiatan penambangan yang dilaksanakan oleh seorang penambang atau eksplorator uranium pada TEUR, serta asumsi konsentrasi gas Radon di lokasi-lokasi tertentu pada TEUR.

Hasil yang diharapkan ialah perhitungan dosis gas Radon yang terhisap oleh seorang pekerja ujung depan daur bahan bakar nuklir secara sederhana, dan terpadu dari kegiatan pengeboran, peledakan, pengangkutan mineralisasi serta penyanggaan dinding dan atap terowongan. Perhitungan yang sederhana tersebut dengan maksud agar mudah diterapkan oleh teknisi di lapangan walau hanya dengan sarana dan prasarana yang sangat terbatas di tengah lebarnya hutan Kalimantan Barat.

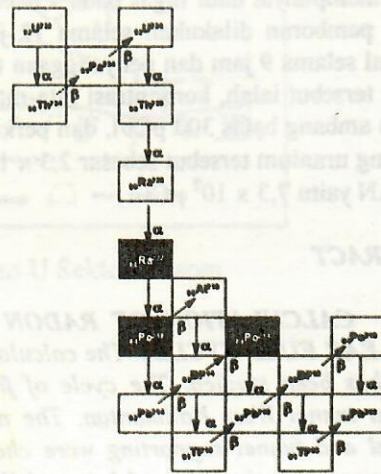
## TEORI

### 1. Konsentrasi Gas Radon

$^{238}\text{U}$  mempunyai seri peluruhan seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Nuklida hasil peluruhan itu terbentuk secara transformasi spontan dengan disintegrasi radioaktif, hingga mencapai elemen stabil. Transformasi spontan tersebut diikuti oleh berbagai pancaran partikel, misalnya alpha ( $\alpha$ ) dan beta ( $\beta$ ). Partikel-partikel  $\alpha$  mempunyai bahaya radiasi yang cukup besar terutama bila unsur-unsur pemancarnya telah masuk ke dalam tubuh manusia. Bahaya radiasi interna yang utama berasal dari  $\alpha$ , disebabkan karena massa partikel  $\alpha$  cukup besar yang terdiri dari dua proton dan dua neutron, daya ionisasinya tinggi dan daya tembusnya kecil sehingga begitu

masuk ke sistem paru-paru sulit untuk keluar dari sistem paru-paru tersebut.

Pemancar  $\alpha$  yang perlu diwaspadai tersebut ialah  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$  dan  $^{214}\text{Po}$ . Radon atau  $^{222}\text{Rn}$ , mempunyai waktu paro 3,82 hari dengan tenaga partikel  $\alpha$  sebesar 5,49 MeV. Polonium atau Radium A atau  $^{218}\text{Po}$  mempunyai waktu paro 3,05 menit dengan tenaga partikel  $\alpha$  sebesar 5,998 MeV. Polonium atau Radium C' atau  $^{214}\text{Po}$  mempunyai waktu paro  $1,64 \times 10^{-4}$  detik dengan energi partikel  $\alpha$  sebesar 7,683 MeV. Walaupun waktu paro dari Radon, Radium A dan C' pendek, tetapi energi partikelnya yang merupakan pemancar  $\alpha$  cukup besar, sehingga dapat menyebabkan kanker paru-paru bagi pekerja tambang uranium.



Gambar 1. Seri peluruhan Uranium.

Dari Tabel 1<sup>6</sup>, dapat diketahui berbagai macam nuklida seri Uranium ( $\text{U}^{238}$ ) beserta tipe integrasinya, waktu paro dan energi partikel dalam Mega elektron Volt (MeV)

Konsentrasi Tertinggi yang Diijinkan (KTD) untuk gas Radon untuk pekerja radiasi termasuk penambang atau eksplorator uranium ialah 300 pCi/liter<sup>2</sup>. Tetapi Baku Tingkat Radioaktivitas di Lingkungan, untuk  $^{222}\text{Rn}$  mempunyai KTD  $4 \times 10^{-1}$  Bq/l atau setara dengan 108,108 pCi/l<sup>3</sup>, sehingga KTD Baku Tingkat radioaktivitas di Lingkungan untuk  $^{222}\text{Rn}$  adalah sepertiga lebih rendah untuk KTD pekerja radiasi. KTD pekerja radiasi tersebut dapat dikonversikan dengan jumlah cacah per detik CPM (Count Per Minute atau Cacah Per Menit).

Secara empirik<sup>6</sup> untuk botol cuplikan konsentrasi gas Radon dengan volume 125 cc, dapat dipersamakan sebagai berikut :

$$\text{CPM}_{125} = \Sigma \alpha \times C \times \text{KTD} \times I_{125} \times \text{DG}_{125} \times W \dots\dots (1)$$



dimana :

- $\Sigma\alpha$  : banyaknya zarah  $\alpha$ , yaitu 3 buah dari  ${}_{86}\text{Rn}^{222}$ ,  ${}_{84}\text{Po}^{218}$  dan  ${}_{84}\text{Po}^{214}$  dalam satuan buah.
- C : definisi untuk 1 Curie =  $3,7 \times 10^{10}$  disintegrasi per detik.
- KTD : konsentrasi tertinggi yang diijinkan =  $3 \times 10^{-10}$  Ci pemancar  $\alpha$  per liter udara.
- $I_{125}$  : isi botol cuplikan 125 cc.
- DG<sub>125</sub> : dayaguna botol cuplikan 125 cc sebesar 60%.
- W : waktu penghitungan cuplikan selama 60 detik.

Dari persamaan (1) tersebut diperoleh untuk batas konsentrasi Radon 300 pCi per liter dengan botol cuplikan 125 cc, maka detektor *photomultiplier* Ag Zn S akan mencacah sebesar 150 Cacah Per Menit (CPM). Rumus (1) ini digunakan untuk pengambilan cuplikan gas radon di TEUR, pada kegiatan pengeboran, peledakan, pengangkutan batuan mineralisasi dan penyanggaan terowongan. Hasil dari pengambilan cuplikan tersebut, nantinya dimasukkan pada Tabel 2 kolom 6.

## 2. Batas konsentrasi Radon untuk daerah kerja penambangan uranium.

Berdasarkan aturan penambangan uranium yang sudah mapan seperti di Perancis<sup>6</sup>, untuk konsentrasi gas Radon yang setimbang dengan turunannya dan terhisap pekerja tambang uranium selama 264 hari kerja efektif, dimana sehari bekerja selama 8 jam, tidak boleh melebihi  $3 \times 10^{-10}$  Curie pemancar  $\alpha$  per liter udara<sup>6</sup>. Aturan tersebut sesuai dengan Konsentrasi Tertinggi yang Diijinkan (KTD) untuk gas Radon untuk pekerja radiasi termasuk penambang atau eksplorator uranium ialah 300 pCi/liter<sup>2</sup>. Sehingga konsentrasi tertinggi yang diijinkan (KTD) dipersamakan sebagai:

$$1 \text{ KTD} = 300 \text{ pCi per liter} \dots\dots\dots (2)$$

dimana:

- KTD : Konsentrasi Tertinggi yang Diijinkan dalam satuan pCi per liter.
- pCi : pico Curie =  $10^{-12}$  Curie

Di Perancis<sup>6</sup>, untuk daerah kerja penambangan tertentu dengan konsentrasi Radon di udara melebihi KTD 300 pCi per liter atau melebihi ketentuan persamaan (2) di atas, misalnya melebihi  $100 \times 10^{-10}$  Curie per liter udara atau  $10^4$  pCi per liter atau 33 KTD, maka

tanpa menunggu perintah resmi dari penyelia tambang, para pekerja tambang uranium dilarang bekerja di daerah kerja tersebut. Selanjutnya, terowongan tersebut diberi tanda merah dengan tulisan bahaya radiasi (*danger d'irradiation*) atau dilarang masuk (*franchisement interdit*). KTD dari persamaan (2) tersebut, digunakan untuk menganalisis apakah konsentrasi gas Radon hasil perhitungan pada Tabel 3 kolom 8, sudah atau belum melebihi KTD yang telah ditentukan.

Berdasarkan pengalaman empirik dan aturan penambangan di Perancis<sup>6</sup> dalam seminggu pemantauan tingkat konsentrasi gas Radon dilakukan tidak boleh kurang dari sekali pemantauan untuk seluruh daerah kerja dan tempat-tempat pergantian giliran kerja serta pergantian daerah aliran ventilasi. Untuk beberapa titik tertentu seperti pada daerah yang lama telah ditinggalkan tidak untuk kegiatan penambangan uranium lagi, yang biasanya kurang debit aliran udara ventilasinya sehingga konsentrasi Radon diduga akan meningkat, harus dilakukan pemantauan tingkat konsentrasi gas Radon sekurang-kurangnya 3 kali dalam waktu seminggu. Daerah mineralisasi, yang merupakan daerah kerja pengeboran, peledakan, pengambilan atau transportasi mineral serta penyanggaan terowongan, harus dilakukan sekali pengambilan cuplikan konsentrasi gas Radon di udara untuk setiap kali saat kegiatan pengeboran, setiap kali setelah dilakukan peledakan mineral, setiap kali saat dilakukan pengambilan atau pengangkutan mineral tambang, serta setiap kali kegiatan penyanggaan terowongan.

## 3. Konsentrasi rerata gas Radon dan turunannya

Konsentrasi rerata Radon dan turunannya pada daerah kerja tertentu i dalam sehari, dipersamakan sebagai:

$$K_i = ((W_{Bi} \times R_{Bi} + W_{Li} \times R_{Li} + W_{Ai} \times R_{Ai} + W_{Si} \times R_{Si}) \times 300 \text{ pCi/liter}) / 8 \text{ jam} \dots\dots (3)$$

dimana:

- $K_i$  : konsentrasi rerata Radon dan turunannya pada daerah kerja ke i tertentu, dalam satuan pCi/liter.
- $W_{Bi}$  : waktu bekerja saat kegiatan pengeboran daerah mineralisasi, dalam satuan jam.
- $W_{Li}$  : waktu bekerja setelah peledakan daerah mineralisasi, dalam satuan jam.
- $W_{Ai}$  : waktu bekerja saat kegiatan pengambilan atau pengangkutan batuan mineral, dalam satuan jam.
- $W_{Si}$  : waktu bekerja saat kegiatan



- penyanggaan terowongan, dalam satuan jam.
- $R_{Ai}$  : faktor kelipatan konsentrasi Radon di daerah kerja pengeboran daerah mineralisasi, tanpa satuan.
- $R_{Li}$  : faktor kelipatan konsentrasi Radon di daerah kerja peledakan daerah mineralisasi, tanpa satuan
- $R_{Ai}$  : faktor kelipatan konsentrasi Radon di daerah kerja pengambilan atau pengangkutan batuan mineral, tanpa satuan
- $R_{Si}$  : faktor kelipatan konsentrasi Radon di daerah kerja penyanggaan terowongan, tanpa satuan
- 8 jam : waktu maksimum bekerja dalam sehari bagi penambang uranium
- i : daerah kerja ke I, tanpa satuan (*dimensionless*)

Menurut BATAN<sup>2</sup>, batas turunan kadar di udara dengan penyinaran 2000 jam per tahun untuk gas Radon  $^{86}\text{Rn}^{222}$  kadar atau konsentrasinya sebesar  $3 \times 10^{-7} \text{ Ci/m}^3$ .

Total dosis gas Radon dan turunannya dalam keadaan setimbang atau TDR yang diserap oleh paru-paru seorang pekerja tambang uranium ialah:

$$TDR = \sum_{i=1}^{i=n} \frac{B_i \cdot x \cdot K_i}{2} \dots\dots\dots(4)$$

dimana:

- TDR : Total dosis Radon yang diserap seorang pekerja tambang uranium untuk setiap liter udara yang terhisap ke dalam paru-paru penambang atau eksplorator uranium, dalam satuan pCi
- $B_i$  : Banyaknya frekuensi kegiatan dalam satu daur kegiatan penambangan yang dilakukan pada daerah kerja tertentu tanpa satuan
- $K_i$  : Konsentrasi rerata Radon dan turunannya pada daerah kerja tertentu i dalam satuan pCi/liter
- i : daerah kerja tertentu tanpa satuan (*dimensionless*)

Menurut BATAN<sup>2</sup>, batas masukan tahunan berbagai radionuklida berdasarkan faktor kelarutan melalui pernafasan untuk pekerja radiasi, dalam hal ini termasuk pekerja tambang uranium, tertulis bahwa untuk gas Radon  $^{86}\text{Rn}^{222}$  dosisnya sebesar  $7,3 \times 10^2 \mu\text{Ci}$ .

Diasumsikan pekerja tambang tersebut dalam setahun bekerja 11 bulan dimana 1 bulan

tidak bekerja untuk cuti tahunan dan ijin-ijin keperluan penting lainnya. Dalam semenit, orang bernafas 20 kali, dengan volume udara yang dihisap paru-paru sekitar 2 (dua) liter<sup>9</sup>. Menurut H. Joffre<sup>8</sup>, zat radioaktif yang diserap manusia melalui paru-paru hanya 1/8 bagian yang tinggal di paru-paru, lainnya tinggal dikerongkongan, aliran darah serta organ tubuh tertentu.

## TATA KERJA

1. Diasumsikan bahwa seorang penambang atau eksplorator TEUR bekerja selama 4 (empat) minggu dalam sebulan, datanya dimasukkan ke Tabel 2 kolom 1, yaitu minggu I, II, III dan IV.
2. Diasumsikan lokasi kegiatan penambangan di terowongan silang (TS)- I, II, III dan IV pada terowongan eksplorasi uranium di Remaja (TEUR) Kalimantan Barat, seperti pada Gambar 2. Datanya dimasukkan ke Tabel 2 kolom 2, yaitu : TS - I, TS - II, TS - III dan TS - IV.
3. Diasumsikan frekuensi bekerja ( $B_i$ ) dari seorang penambang atau eksplorator TEUR, dengan data seperti pada Tabel 2 kolom 3. Data ini nantinya untuk dikalikan dengan konsentrasi rerata gas radon pada lokasi tertentu ( $K_i$ ) dari hasil perhitungan seperti tertera pada Tabel 3 kolom 8.
4. Dicatat jenis kegiatannya serta lamanya waktu bekerja ( $W_i$ ) pada masing-masing jenis kegiatan tersebut dari penambang atau eksplorator TEUR dan datanya dimasukkan ke Tabel 2 kolom 4 dan 5
5. Botol untuk mencuplik konsentrasi gas radon bagian dalamnya berlapis AgZnS, dengan volume 125 cc. Sebelum digunakan untuk mencuplik gas radon, botol harus disemprot bagian dalamnya dengan udara bertekanan hingga bersih dari debu-debu yang mengandung gas radon. Untuk mengetahui botol-botol tersebut sudah bersih, botol dicacah dengan menggunakan alat *photomultiplier* detektor  $\alpha$ . Jika hasil cacahan sudah mendekati 0 (nol) Cacah Per Menit, maka botol dianggap sudah bersih dari debu-debu yang mengeluarkan gas Radon.
6. Udara dihisap dari dalam botol cuplikan yang ditutup dengan gabus karet pejal, sehingga botol menjadi hampa. Tingkat kehampaan diatur sedemikian rupa sehingga secara ekperimental diharapkan udara daerah penambangan dapat mengalir masuk ke botol melalui lubang tusukan jarum suntik pada gabus karet penutup botol cuplikan.



7. Dicuiplik konsentrasi gas Radon dari setiap lokasi kegiatan penambangan dimana seorang penambang yang diamati bekerja pada saat melaksanakan kegiatan penambangan. Cara pencuplikan adalah dengan menusuk gabus karet penutup botol dengan jarum suntik, sehingga gas Radon di dalam terowongan dapat masuk ke dalam botol cuplikan.
  8. Dicuiplik konsentrasi gas radon setelah 3 (tiga) jam dari waktu pengambilan cuplikan dari lokasi tertentu dan kegiatan penambangan tertentu. Ketika konsentrasi gas radon pada waktu tersebut telah setimbang dengan turunannya <sup>6</sup>, hasilnya dimasukkan ke Tabel 2 kolom 6.
  9. Dihitung perkalian waktu dan konsentrasi Radon beserta turunannya dari Tabel 2 kolom 5 dan kolom 6 dan hasilnya dimasukkan ke Tabel 3 kolom 7.
  10. Dihitung konsentrasi rerata Radon pada daerah kerja ke i atau  $K_{(i)}$  dengan persamaan (3) selama waktu tertentu. Hasilnya dimasukkan ke Tabel 3 kolom 8.
  11. Dihitung masing-masing dosis gas radon dan turunannya yang terserap seorang penambang atau eksplorator uranium, dari Terowongan Silang (TS) I, II, III dan IV, yang merupakan perkalian dari Tabel 3 kolom 3 dan kolom 8. Hasilnya dimasukkan ke Tabel 3 kolom 9.
  12. Dihitung dosis total gas radon atau TDR yang terserap oleh pekerja tambang selama sebulan dengan persamaan (4), yang merupakan jumlah dosis dari Tabel 3 kolom 9. Hasilnya dimasukkan ke Tabel 3 kolom 10.
  13. Dianalisis perbandingan  $K_i$  dan KTD dari persamaan (2) berdasarkan peraturan BATAN maupun COGEMA Perancis. Hasilnya diuraikan pada Bab HASIL DAN PEMBAHASAN.
  14. Dianalisis apakah dosis gas Radon yang diserap tersebut melebihi ambang batas dari ketentuan BATAN untuk jangka waktu 1 (satu) tahun.
- KTD, yaitu pada TS - III yang besarnya 1,094 x KTD atau 328,2 pCi per liter.
3. Dosis gas radon dan turunannya yang terserap penambang atau eksplorator TEUR dalam minggu ke I, II, III, dan IV yang merupakan perkalian dari Tabel 2 atau Tabel 3 kolom 3 dengan Tabel 3 kolom 8, hasilnya dimasukkan ke Tabel 3 kolom 9.
  4. Dosis gas radon dan turunannya yang terserap penambang atau eksplorator pada TEUR selama sebulan merupakan penjumlahan seluruh data pada Tabel 3 kolom 9, dan hasilnya dimasukkan ke Tabel 3 kolom 10, yaitu sebesar 7,563 x 300 pCi.
  5. Berdasarkan asumsi-asumsi yang telah diambil, bahwa penambang atau eksplorator dalam setahun bekerja 11 bulan, dalam 1 (satu) menit orang bernafas 20 kali, dengan volume udara yang terhisap paru-paru sekitar 2 (dua) liter, dan zat radioaktif yang terserap manusia melalui paru-paru hanya 1/8 bagian yang tertinggal di paru-paru maka dalam waktu 1 (satu) bulan gas Radon yang telah terhisap oleh penambang atau eksplorator TEUR ialah sebanyak 31 jam x 60 menit x 20 kali x 2 liter x 1/8 bagian = 9300 liter. Waktu selama 31 jam dari perhitungan tersebut, berasal dari Tabel 2 atau Tabel 3 kolom 5.
  6. Dosis gas radon selama 1 (satu) tahun yang diterima penambang atau eksplorator TEUR ialah 11 bulan x 7,563 x 300 pCi/ liter x 9300 liter =  $2,3 \times 10^2$   $\mu$ Ci. Dosis ini masih di bawah batas masukan tahunan melalui pernafasan untuk <sup>86</sup>Rn<sup>222</sup> yang telah ditentukan BATAN yaitu  $7,3 \times 10^2$   $\mu$ Ci.
  7. Jika daerah-daerah kerja TS - I, TS - II, dan TS - IV dianalisis, ternyata konsentrasi gas Radon di udara belum melebihi batas yang ditentukan oleh BATAN. Sedang pada TS - III sedikit melebihi, yaitu sebesar 328,2 pCi/liter.

## HASIL DAN BAHASAN

1. Hasil perkalian waktu ( $W_i$ ) dari Tabel 2 kolom 5 dengan konsentrasi Radon dan turunannya ( $R_i$ ) dari Tabel 2 kolom 6, hasilnya dimasukkan ke Tabel 3 kolom 7.
2. Hasil perhitungan konsentrasi gas Radon dan turunannya dalam sehari dengan menggunakan persamaan (3), hasilnya dimasukkan pada Tabel 3 kolom 8. Ternyata konsentrasi gas radon beserta turunannya dalam sehari tersebut ada yang di bawah KTD, yaitu pada Terowongan Silang (TS) - I, II dan IV, tetapi ada yang sedikit melebihi

## SIMPULAN

Perhitungan konsentrasi gas Radon yang terhisap oleh seorang penambang atau eksplorator untuk kegiatan penambangan pada TEUR, yang meliputi kegiatan pengeboran, peledakan, pengambilan atau pengangkutan mineral, serta penyanggaan dinding dan atap terowongan, telah dilaksanakan seperti diuraikan di atas.

Dosis gas Radon yang terserap melalui pernafasan pekerja tambang uranium, tergantung pada jumlah kegiatan, lama kegiatan serta jenis kegiatan penambangan uranium tertentu.

Dari perhitungan yang telah dilakukan di atas, diperoleh konsentrasi gas Radon pada TEUR



masih berada di bawah batas maksimum konsentrasi gas Radon untuk pekerja radiasi yang ditentukan oleh BATAN. Demikian pula, dosis pekerja tambang uranium yang telah diuraikan juga di bawah dosis batas maksimum yang telah ditentukan oleh BATAN yaitu  $2,3 \times 10^2 \mu\text{Ci}^2$ .

#### DAFTAR PUSTAKA

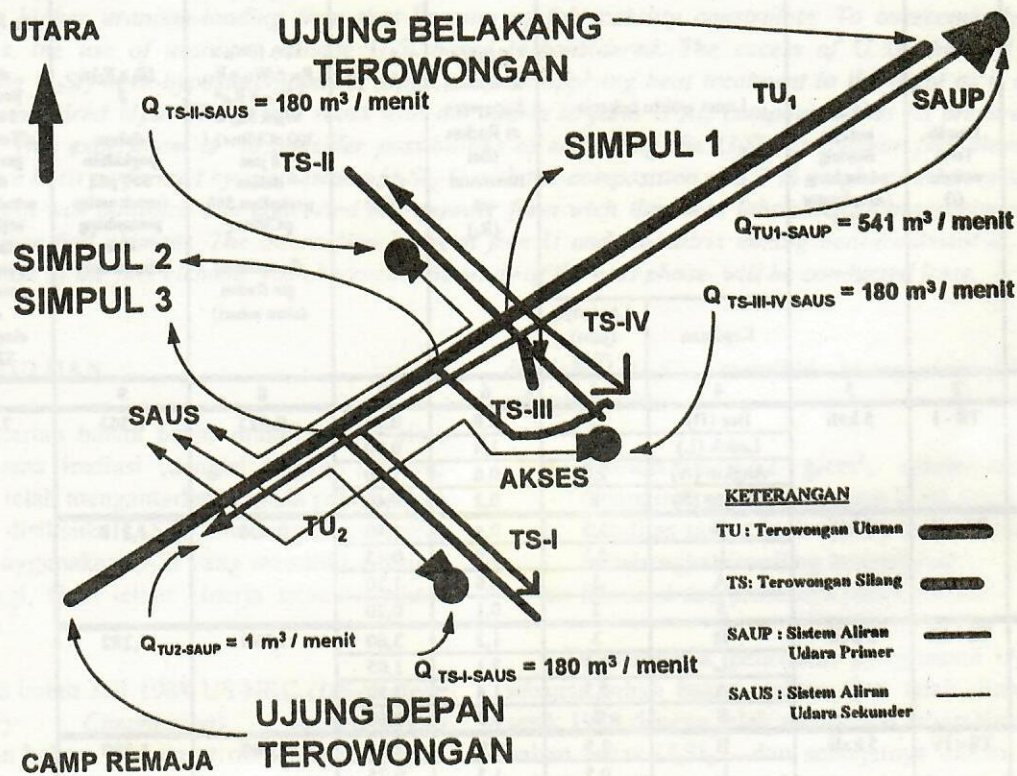
1. SANTOSADJAJA, B., dkk., "Pengukuran emanasi gas Radon dari permukaan lubang bor Long Year - 65", laporan PPBGN/KKL/P/001/90, halaman 3.
2. BATAN, "Ketentuan Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi", Lampiran SK Direktur Jenderal BATAN, nomor : PN 03/160/DJ/89, Jakarta 1989, halaman 143.
3. BATAN, "Baku Tingkat Radioaktivitas di Lingkungan", Keputusan Direktur Jenderal BATAN, Nomor: 293/DJ/VII/1995.
4. BUNAWAS, dkk., "Perkiraan kontaminasi interna radium karyawan PPBGN BATAN", Presentasi Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Lingkungan, Jakarta 18-19 Agustus 1993, ISSN: 0854-4085, halaman 379-394, 1993.
5. CEA, "L'industrie Miniere Francaise de L'Uranium", CIPRA, 1985, halaman 45.
6. COGEMA, "Guide de formation filiere 191-192 la radioprotection," S.F.P. Limoges, 1985, halaman 36 - 80.
7. KAPLAN, I., "Nuclear Physics", Addison-Wesley Publishing Company, Second Edition, 1975.
8. JOFFREE, H., "Détermination des irradiations interne et externe par contamination de l'air e du sol a proximité des piles," CEA, 1985, halaman 2.
9. KALTREIDER et al., "Lung volumes and capacities in resting adults," American Review Tuberculosis, vol. 37, halaman-662, 1938.



Tabel 1. Seri Uranium ( $U^{238}$ )<sup>6</sup>

Nuklida	Tipe Disintegrasi	Waktu Paro	Energi Partikel $\alpha$ (MeV)
$^{92}U^{238}$	$\alpha$	$4,5 \times 10^9$ tahun	4,20
$^{90}Th^{234}$	$\beta$	24,1 hari	0,19
$^{91}Pa^{234}$	$\beta$	1,18 menit	2,32
$^{92}U^{234}$	$\alpha$	$2,5 \times 10^5$ tahun	4,768
$^{90}Th^{230}$	$\alpha$	$8,0 \times 10^4$ hari	4,68 milli elektron Volt
$^{88}Ra^{226}$	$\alpha$	1620 tahun	4,769 milli elektron Volt
$^{86}Ra^{222}$	$\alpha$	3,82 hari	5,49
$^{84}Po^{218}$	$\alpha, \beta$	3,05 menit	$\alpha$ : 5,998
$^{82}Pb^{214}$	$\beta$	26,8 menit	0,7
$^{85}At^{218}$	$\alpha$	1,5 - 2,0 detik	6,697
$^{83}Bi^{214}$	$\alpha, \beta$	19,7 menit	$\alpha$ : 5,51 milli elektron Volt
$^{84}Po^{214}$	$\alpha$	$1,64 \times 10^{-4}$ detik	7,683
$^{81}Tl^{210}$	$\beta$	1,32 menit	1,9
$^{82}Pb^{210}$	$\beta$	19,4 tahun	0,017
$^{83}Bi^{210}$	$\beta$	5,0 hari	1,155
$^{81}Po^{210}$	$\alpha$	138,3 hari	5,305
$^{81}Tl^{206}$	$\beta$	4,2 menit	1,51
$^{82}Pb^{206}$	Stabil		

Sumber: COGEMA, "Guide de formation filiere 191-192 la radioprotection," S.F.P. Limoges, 1985, halaman 80.



Gambar 2. Lokasi kegiatan penambangan pada terowongan eksplorasi uranium Remaja (TEUR).



Tabel 2. Data kegiatan seorang penambang atau eksplorator uranium pada terowongan eksplorasi uranium di Remaja Kalimantan Barat.

Minggu Ke :	Daerah Terowongan (i)	Frekuensi bekerja seorang penambang/ eksplorator (B <sub>i</sub> )	Lama waktu bekerja		Faktor kelipatan konsentrasi Radon (R <sub>i</sub> ) dan turunannya
			Kegiatan	Lamanya dalam jam (W <sub>i</sub> )	
1	2	3	4	5	6
I	TS - I	5 kali	Bor (B)	3	0,8
			Ledak (L)	0,5	1,4
			Angkut (A)	2,5	0,6
			Sangga (S)	2	0,2
II	TS - II	6 kali	B	3,5	0,4
			L	0,5	0,9
			A	2	0,6
			S	2	0,1
III	TS - III	6 kali	B	3	1,2
			L	0,5	2,1
			A	2,5	1,4
			S	2	0,3
IV	TS - IV	5 kali	B	2,5	0,9
			L	0,5	1,5
			A	2	0,7
			S	2	0,2

Tabel 3. Hasil dosis gas Radon yang terhisap oleh seorang pekerja ujung depan daur bahan bakar nuklir pada terowongan eksplorasi uranium di Remaja Kalimantan Barat.

Minggu Ke:	Daerah Terowongan (i)	Frekuensi bekerja seorang penambang / eksplorator (B <sub>i</sub> )	Lama waktu bekerja		Faktor kelipatan konsentra si Radon dan turunann ya (R <sub>i</sub> )	(W <sub>i</sub> ) x (R <sub>i</sub> )	K <sub>i</sub> = {(W <sub>B</sub> x R <sub>B</sub> + W <sub>L</sub> x R <sub>L</sub> + W <sub>A</sub> x R <sub>A</sub> + W <sub>S</sub> x R <sub>S</sub> ) x 300 pCi/liter} / 8 jam dalam perkalian 300 pCi/liter  (konsentrasi gas Radon dalam sehari)	{B <sub>i</sub> x K <sub>i</sub> } x 2  dalam perkalian 300 pCi (untuk setiap penambang atau eksplorator)	TDR = $\sum_{i=1}^n \frac{B_i K_i}{2}$  dalam perkalian 300 pCi (Total dosis gas Radon dalam sebulan untuk setiap liter udara yang terhisap penambang atau eksplorator TEUR)
			Kegiatan	Lamanya (jam) (W <sub>i</sub> )					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I	TS - I	5 kali	Bor (B)	3	0,8	0,24	0,625	1,563	7,363
			Ledak (L)	0,5	1,4	0,70			
			Angkut (A)	2,5	0,6	1,50			
			Sangga (S)	2	0,2	0,40			
II	TS - II	6 kali	B	3,5	0,4	1,40	0,406	1,218	
			L	0,5	0,9	0,45			
			A	2	0,6	1,20			
			S	2	0,1	0,20			
III	TS - III	6 kali	B	3	1,2	3,60	1,094	3,282	
			L	0,5	2,1	1,05			
			A	2,5	1,4	3,50			
			S	2	0,3	0,60			
IV	TS - IV	5 kali	B	2,5	0,9	2,25	0,600	1,500	
			L	0,5	1,5	0,75			
			A	2	0,7	1,40			
			S	2	0,2	0,40			