

# PANDUAN TEKNIKAL

## RADON, TORON DAN ANAK-ANAKNYA



Lembaga Perlesenan Tenaga Atom  
Kementerian Sains Teknologi & Inovasi  
Batu 24, Jalan Dengkil, 43800 Dengkil  
Selangor Darul Ehsan  
Tel: 03-8922 5888  
Fax: 03-8922 3685  
Laman Web: <http://www.aelb.gov.my>

## KANDUNGAN

<b>Bil.</b>	<b>Perkara</b>	<b>Muka surat</b>
1.	Tujuan	3
2.	Pengenalan	3
3.	Apa itu radon, toron dan anak-anaknya?	4
4.	Bagaimana gas radon dan toron boleh wujud?	5
5.	Apakah unit dan had yang terpakai?	6
6.	Pengukuran radon, toron dan anak-anaknya	12
7.	Cara bagi mengurangkan kepekatan aktiviti gas radon, toron dan anak-anaknya	13
8.	Bahan rujukan	14
9.	Rekod Dokumen	14
10.	Lampiran 1  Gambar rajah 1: Anak-anak Radon ( <i>Immediate decay products</i> )  Gambar rajah 2: Anak-anak Toron ( <i>decay products</i> )	15
11.	Lampiran 2  Pengiraan Had Tahunan Anak-anak Radon dan Toron	16

## **RADON, TORON DAN ANAK-ANAKNYA**

### **Tujuan**

1. Tujuan panduan ini disediakan ialah untuk memberi penerangan ringkas berkenaan dengan radon, toron dan anak-anaknya, dan sesuai dijadikan rujukan kepada mereka yang berurusan dengan perusahaan perlombongan bijih timah sama ada secara langsung atau sebaliknya.

### **Pengenalan**

2. Radon dan toron merupakan gas radioaktif yang terhasil daripada batu dan tanah dan kebiasaannya terkumpul di kawasan tertutup seperti perlombongan bawah tanah, rumah bawah tanah dan gua. Selain itu, sumber radon dan toron juga berpunca daripada bahan pembinaan yang digunakan untuk rumah kediaman, sekolah dan tadika, serta air yang diekstrak daripada perigi.

3. Di Malaysia radon, toron dan anak-anaknya selalu dikaitkan dengan perusahaan perlombongan bijih timah terutamanya yang melibatkan aktiviti-aktiviti seperti mengilang, menstor dan memproses amang, monazite dan lain-lain mineral yang mengandungi bahan radioaktif tabii (*Naturally Occurring Radioactive Materials*, NORM) secara semula jadi. Bahan mineral yang mengandungi bahan radioaktif tabii ini sentiasa memancarkan sinaran mengion yang sedia ada wujud dalam kerak bumi dan terdapat dalam semua tisu organisma hidup. Kebiasaannya bahan

radioaktif ini wujud sama ada dalam kandungan uranium-238 (U-238) atau Thorium-232 (Th-232).

### **Apa itu radon, toron dan anak-anaknya?**

4. Gas radon dan toron masing-masing terhasil daripada pereputan uranium ( $^{238}\text{U}$ ) dan Thorium ( $^{232}\text{Th}$ ) secara semula jadi di dalam tanah dan batu. Gas radon dan toron merupakan penyumbang utama punca sinaran mengion yang diterima oleh orang awam.

5. Dalam Susunan Berkala Unsur-unsur (*Periodic Tables of Elements*), ciri-ciri radon, toron dan anak-anaknya ada diberikan dengan lebih terperinci.

6. Radon adalah unsur yang mempunyai jumlah proton (nombor atom) sebanyak 86 dan nombor jisimnya (neutron + proton) berbeza-beza dari 200 hingga 222. Penerangan ringkas berkenaan radon, toron dan anak-anaknya adalah seperti berikut:

(a) Radon

Radon ialah isotop yang mempunyai nombor atom (Z) 86 dan nombor jisim (jumlah neutron dan proton) 222 (Rn-222).

(b) Toron

Toron ialah isotop yang mempunyai nombor atom (Z) 86 dan nombor jisim (jumlah neutron dan proton) 220 (Rn-220).

Kedua-dua radon dan toron dalam keadaan normal adalah bersifat gas dan juga bersifat radioaktif yang masing-masing mempunyai tempoh separuh hayat selama 3.8 hari dan 55.6 saat.

(c) Anak-anak radon

Oleh kerana radon (Rn-222) bersifat radioaktif, maka ia menyepai (*disintegrate*) menjadi anak-anak radon sehingga akhirnya terhasil nuklid yang stabil (sila rujuk Gambar rajah 1, Lampiran 1). Anak-anak radon termasuklah  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  dan  $^{214}\text{Po}$ .

(d) Anak-anak toron

Toron (Rn-220) juga bersifat radioaktif, maka ia akan menyepai menjadi anak-anak toron sehingga akhirnya terhasil nuklid yang stabil (sila rujuk gambar Gambar rajah 2, Lampiran 1). Anak-anak toron termasuklah  $^{216}\text{Po}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$  dan  $^{212}\text{Po}$ .

### **Bagaimana gas radon dan toron boleh wujud?**

7. Tempat yang terdapat uranium atau torium, biasanya akan terdapat gas radon atau toron.

- (a) Gas radon (Rn-222) dihasilkan apabila unsur radium-226 yang mempunyai tempoh separuh hayat selama 1600 tahun menyepai mengikut siri pereputan uranium-238.
- (b) Gas toron (Rn-220) dihasilkan apabila unsur radium-224 yang mempunyai tempoh separuh hayat selama 3.64 hari menyepai, dalam siri pereputan torium-232.

8. Oleh yang demikian di kawasan seperti kawasan lombong bijih timah, penstoran dan pengilangan mineral yang mengandungi uranium-238 atau torium-232, besar kemungkinan akan terdapat gas radon (Rn-222) atau gas toron (Rn-220) bebas di udara (*airborne*). Sekiranya terdapat ruang yang peredaran udaranya (*ventilation*) tidak mencukupi, maka kepekatan radon, toron dan anak-anaknya akan menjadi tinggi di dalam ruang tersebut.

### **Apakah unit dan had yang terpakai?**

9. Unit dan had yang terpakai adalah seperti berikut:

#### **9.1 Unit**

- (a) Unit yang biasa digunakan bagi pengukuran kepekatan gas radon, toron dan anak-anaknya adalah:
  - i. Aras Kerja (Working Level, WL)
  - ii. Bulan Aras Kerja (Working Level Month, WLM)

- iii. unit SI (Bacquerel per meter padu, Bq m<sup>-3</sup>)  
atau Kepekatan (picoCurie per liter, pCi L<sup>-1</sup>)
- (b) Bergantung kepada peralatan yang diguna untuk pengukuran sama ada:
- i. Mengukur kepekatan gas radon dan toron; atau
  - ii. Mengukur sinaran yang dihasilkan daripada progeninya (anak-anak radon dan toron) akan memberikan unit yang berbeza seperti jadual di bawah:

Bil	Jenis peralatan	Unit yang digunakan
1	Mengukur kepekatan gas radon dan toron	Bq m <sup>-3</sup> atau pCi L <sup>-1</sup>
2	Mengukur sinaran yang dihasilkan daripada progeninya	WL

## 9.2 Takrifan

- i. Aras Kerja (WL):  
Sebarang kombinasi anak-anak radon atau anak-anak toron dalam 1 liter (1000 cc) udara yang mengandungi 222 dpm (100 pCi atau 3.7 Bq) menghasilkan pelepasan muktamad (*ultimate emission*) tenaga alfa sebanyak  $1.3 \times 10^5$  MeV. Dalam Unit SI, WL adalah setara dengan  $2.1 \times 10^{-5}$  J m<sup>-3</sup>.

ii. Bulan Aras Kerja (WLM):

1 WLM adalah satu unit dedahan terhadap anak-anak radon atau anak-anak toron, di mana kuantiti dedahan pekerja dalam sebulan adalah selama 170 jam. Satu Bulan Aras Kerja (1 WLM) adalah bersamaan dengan unit SI  $3.54 \text{ mJ.h m}^{-3}$  atau 170 WL.h.

Oleh kerana dos daripada gas radon dan toron adalah kecil dibandingkan dengan dos daripada anak-anak radon dan anak-anak toron maka hanya dos daripada anak-anak radon dan toron yang diambilkira.

### 9.3 Kaitan di antara WL dengan WLM

(Rujukan: Susunan satu Jadual Ketiga Susunan I dan II (Peraturan-peraturan Perlesenan Tenaga Atom (Perlindungan Sinaran Keselamatan Asas) 2010 [P.U. (A) 46])

1 WL adalah setara dengan  $2.10 \times 10^{-5} \text{ J.m}^{-3}$

1 WLM adalah setara dengan  $3.54 \text{ mJ.h.m}^{-3}$  atau 170 WL.h

1 WL =  $1.3 \times 10^5 \text{ MeV (tenaga alfa) L}^{-1}$  =  $1.3 \times 10^8 \text{ MeV (tenaga alfa) m}^{-3}$

1 MeV =  $1.602 \times 10^{-13} \text{ J}$

Maka,  $1 \text{ WL} = 1.3 \times 10^8 \times 1.602 \times 10^{-13} \text{ J m}^{-3}$   
 $= 2.0826 \times 10^{-5} \text{ J m}^{-3}$

$1 \text{ WL} = 2.10 \times 10^{-5} \text{ J m}^{-3} \dots\dots(i)$
---



Daripada takrifan:

$$1 \text{ WLM} = 170 \text{ WL.h}$$

Menggunakan nilai WL seperti di atas didapati:

$$1 \text{ WLM} = 170 \text{ h} \times 2.08 \times 10^{-5} \text{ J m}^{-3}$$

Nilai yang diberikan dalam takrif WLM ialah  $3.54 \text{ mJ.h m}^{-3}$ .

Oleh itu:

$1 \text{ WLM} = 3.54 \text{ mJ.h m}^{-3} \dots\dots\dots \text{(ii)}$
--

#### **9.4 Pekali Penukaran untuk unit dan projeni radon (Faktor keseimbangan = 0.4)**

(Rujukan: Jadual Ketiga Susunan II (Peraturan-peraturan Perlesenan Tenaga Atom (Perlindungan Sinaran Keselamatan Asas) 2010 [P.U. (A) 46])

$$1 \text{ WLM} = 3.54 \text{ mJ.h m}^{-3}$$

$$1 \text{ Bq h m}^{-3} = 2.22 \times 10^{-6} \text{ mJ.h m}^{-3}$$

$$1 \text{ Bq h m}^{-3} = 6.28 \times 10^{-7} \text{ WLM}$$

(a) di rumah : dengan anggapan 7000 jam setahun berada dalam rumah (orang awam)

(i) Dedahan tahunan terhadap projeni radon per unit kepekatan radon

$$1 \text{ Bq m}^{-3} = 1.56 \times 10^{-2} \text{ mJ.h m}^{-3}$$

$$1 \text{ Bq m}^{-3} = 4.40 \times 10^{-3} \text{ WLM}$$

(ii) Konvensyen penukaran dos, dos berkesan per unit dedahan terhadap progeni radon

$$1 \text{ mJ.h m}^{-3} = 1.1 \text{ mSv}$$

$$1 \text{ WLM} = 4 \text{ mSv}$$

(b) di tempat kerja: dengan anggapan 2000 jam bekerja setahun di tempat kerja

(i) Dedahan tahunan terhadap progeni radon per unit kepekatan radon

$$1 \text{ Bq m}^{-3} = 4.45 \times 10^{-3} \text{ mJ.h m}^{-3}$$

$$1 \text{ Bq m}^{-3} = 1.26 \times 10^{-3} \text{ WLM}$$

(ii) Konvensyen penukaran dos, dos berkesan per unit dedahan terhadap progeni radon

$$1 \text{ mJ.h m}^{-3} = 1.4 \text{ mSv}$$

$$1 \text{ WLM} = 5 \text{ mSv}$$

## 9.5 Had

(a) Had (*limit*) yang terpakai seperti yang ditetapkan dalam Peraturan-peraturan Perlesenan Tenaga Atom (Perlindungan Sinaran Keselamatan Asas) 2010, Jadual Ketiga Perenggan (9) dan Susunan I adalah seperti berikut:

Anak radon: hasil penyepaian  $^{222}\text{Rn}$  yang berbahaya pendek:

$^{218}\text{Po}$  (RaA),  $^{218}\text{At}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  (RaB),  $^{214}\text{Bi}$  (RaC'),  $^{214}\text{Po}$  (RaC) dan  $^{210}\text{Tl}$  (RaC'')

Bagi dedahan di tempat kerja terhadap progeni radon dengan menggunakan suatu pekali penukaran 1.4 mSv per  $\text{mJ.h m}^{-3}$ , had dos yang dirujuk dalam peraturan 8 P.U. (A) 46 Peraturan-peraturan Perlesenan Tenaga Atom (Perlindungan Sinaran Keselamatan Asas) 2010 ialah 20 mSv yang bersamaan dengan  $14 \text{ mJ.h.m}^{-3}$  (4 WLM) dan 50 mSv yang bersamaan dengan  $35 \text{ mJ.h.m}^{-3}$  (10 WLM).

(b) Anak toron: hasil penyepaian  $^{220}\text{Rn}$  yang berhayat pendek:

$^{216}\text{Po}$  (ThA),  $^{212}\text{Pb}$  (ThB),  $^{212}\text{Bi}$  (ThC),  $^{212}\text{Po}$  (ThC') dan  $^{208}\text{Tl}$  (ThC')

Bagi dedahan di tempat kerja terhadap progeni toron dengan menggunakan suatu pekali penukaran 1.4 mSv per  $\text{mJ.h m}^{-3}$ , had dos yang dirujuk dalam peraturan 8 P.U. (A) 46 Peraturan-peraturan Perlesenan Tenaga Atom (Perlindungan Sinaran Keselamatan Asas) 2010 ialah 20 mSv yang bersamaan dengan  $42 \text{ mJ.h.m}^{-3}$  (12 WLM) dan 50 mSv yang bersamaan dengan  $105 \text{ mJ.h.m}^{-3}$  (30 WLM).

(c) Contoh pengiraan had tahunan anak-anak Radon dan Toron adalah seperti dalam **Lampiran 2**.

## 9.6 Aras Rujukan (Reference Level)

(Rujukan: GSR Part 3 – *Exposure due to radon in workplaces*)

- (a) Aras rujukan radon bagi bangunan yang mempunyai penghunian untuk orang awam termasuk tadika, sekolah dan hospital adalah  $300 \text{ Bq m}^{-3}$ . Dengan anggapan kadar penghunian tahunan 7000 jam, kepekatan aktiviti  $300 \text{ Bq m}^{-3}$  berpadanan dengan dos berkesan tahunan 10 mSv.
- (b) Aras rujukan radon bagi tempat kerja hendaklah ditetapkan agar tidak melebihi purata kepekatan aktiviti  $1000 \text{ Bq m}^{-3}$ . Dengan anggapan kadar penghunian tahunan 2000 jam, kepekatan aktiviti  $1000 \text{ Bq m}^{-3}$  berpadanan dengan dos berkesan tahunan 10 mSv.

### **Pengukuran radon, toron dan anak-anaknya**

10. Gas radon, toron dan anak-anaknya boleh dikesan dan diukur dengan menggunakan alat-alat khas dan menggunakan prosedur-prosedur pengukuran yang tertentu. Alat-alat yang boleh digunakan termasuklah:

- i. RDA-200;*
- ii. ALPHA PRISM.*
- iii. RAD-7*
- iv. Tracerlab*
- v. Alpha Detector*

- vi. Electret Ion Chamber*
- vii. Digital Detector*
- viii. Activated Charcoal Adsorption*
- ix. Charcoal Liquid Scintillation*
- x. Continuous Radon Monitoring*
- xi. Continuous Working Level Monitoring*
- xii. Specialized Measurement Devices*

**Cara bagi mengurangi kepekatan aktiviti gas radon, toron dan anak-anaknya**

11. Cara bagi mengurangi kepekatan aktiviti gas radon, toron dan anak-anaknya adalah melalui sistem pengudaraan yang baik (contoh: penstoran sistem terbuka, bilik dengan tingkap dan pintu serta kipas/penyaman udara dan lain-lain).

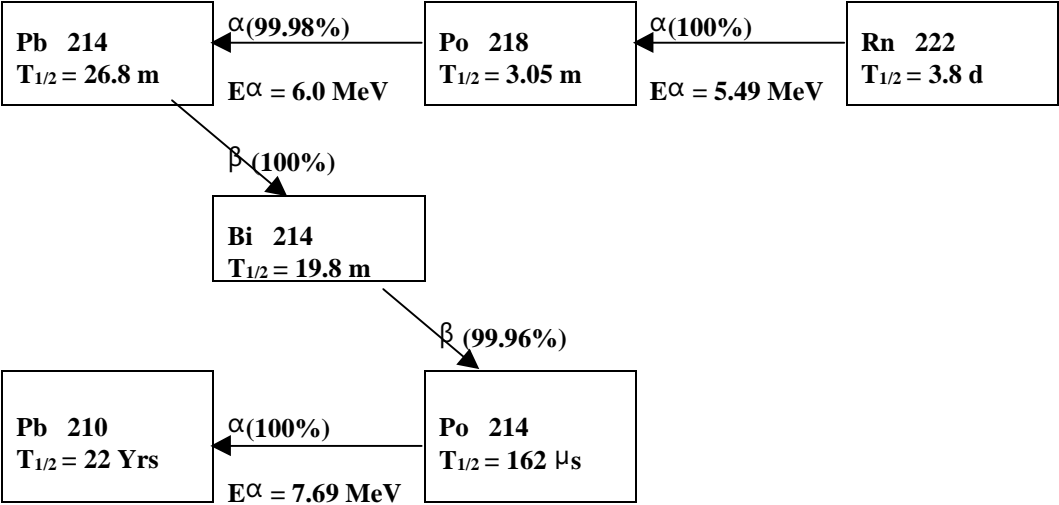
## Bahan Rujukan:

- a) Muhamat Omar Zalina Laili, 2015, Bahan Radioaktif Tabii dan Manusia, Dewan Bahasa dan Pustaka, Kuala Lumpur
- b) *World Health Organization, 2009, WHO Handbook on Indoor Radon- A Public Health Perspective*
- c) *ICRP, 1993, Protection against Radon at Home and at Work, ICRP Publication 65,*
- d) AELB, 2010, Peraturan-peraturan Perlesenan Tenaga Atom (Perlindungan Sinaran Keselamatan Asas) 2010 [P.U. (A) 46]
- e) *IAEA, 2014, GSR Part 3 Radiation Protection and Safety of Radiation Sources – International Basics Safety Standards*

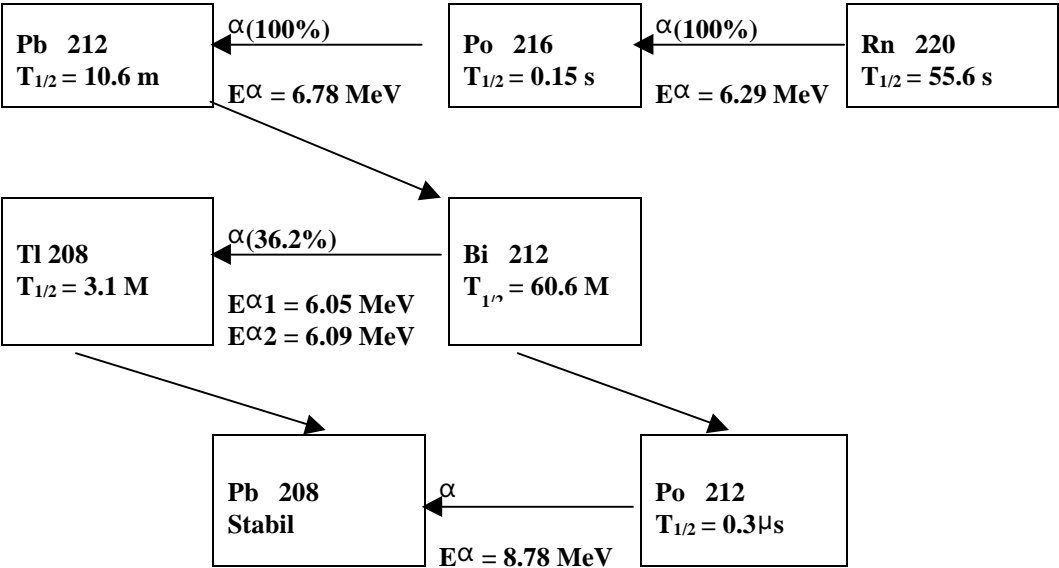
## Rekod Dokumen

<b>Tarikh Terimapakai</b>	<b>Status Semakan</b>	<b>Penyedia</b>
Disember 1988	0	1. AELB
4 April 2017	1	1. Pn Lim Ai Phing 2. Dr Teng Iyu Lin 3. Tn Hj Hasmadi Hassan

Lampiran 1



Rajah I. Anak-anak Radon (*Immediate decay products*)



Rajah 2: Anak-anak Toron (*decay products*)

## Lampiran 2

### Pengiraan Had Tahunan Anak-anak Radon dan Toron

(a) Anak Radon

i. Pekali Penukaran  $\sim 1.4\text{mSv/mJ.h m}^{-3}$

$$\begin{aligned}\therefore 1 \text{ mSv} &= 0.71 \text{ m.J.h m}^{-3} \\ 20 \text{ mSv} &\approx 14 \text{ m.J.h m}^{-3} \\ &\approx 14 \text{ m.J.h m}^{-3} \times 0.25 \text{ WLM / m.J.h m}^{-3} \\ &\approx 4 \text{ WLM (1WLM = 5 mSv)}\end{aligned}$$

ii. Pengambilan Had Tahunan (*Annual Limit Intake*, ALI) bagi Rn-222 = 0.017 J

$$\begin{aligned}\text{Kadar pernafasan} &= 0.02 \text{ m}^3/\text{minit} \\ &= 0.02 \times 60 \text{ m}^3 \text{ per jam} \\ &= 1.2 \text{ m}^3 \text{ per jam (m}^3/\text{h)}\end{aligned}$$

iii. Isipadu udara pernafasan setahun =  $0.02 \text{ m}^3/\text{minit} \times 60 \text{ minit} \times 2000 \text{ jam}$   
(*working time*)

$$= 2,400 \text{ m}^3$$

iv. *Derived Activity Concentration* (DAC);

$$\begin{aligned}\text{DAC} &= \frac{\text{ALI}}{2400 \text{ m}^3} = \frac{0.017 \text{ J m}^{-3}}{2400 \text{ m}^3} \\ &= 7.08 \times 10^{-5} \text{ J m}^{-3} \\ 1 \text{ WL} &= 7.08 \times 10^{-5} \text{ J m}^{-3}\end{aligned}$$

v. Had Pendedahan Tahunan (*Annual Limit of Exposure*, ALE)

$$\begin{aligned}\text{ALE} &= \frac{\text{ALI}}{\text{Kadar pernafasan}} \\ &= \frac{0.017 \text{ J}}{1.2 \text{ m}^3 \text{ per jam}} \\ &= 0.0142 \text{ J.h m}^{-3} \\ 1 \text{ WLM} &= 3.54 \text{ m.J.h m}^{-3} \\ \therefore 0.0142 \text{ J.h m}^{-3} &\approx \frac{0.0142 \text{ J.h m}^{-3}}{3.54 \text{ m.J.h m}^{-3}} \\ &\approx 4 \text{ WLM (untuk pekerja)}\end{aligned}$$

vi. Dos Penukaran di tempat kerja

$$\begin{aligned}5 \text{ mSv per WLM} \\ \therefore 4 \text{ WLM} &= 20 \text{ mSv/tahun}\end{aligned}$$



vii. Untuk orang awam di tempat kerja dengan menggunakan had **1 mSv setahun**:

$$1 \text{ WLM} = 5 \text{ mSv}$$

$$\therefore 4 \text{ WLM} = 20 \text{ mSv}$$

$$1 \text{ mSv} = 1/20 \text{ mSv} \times 4 \text{ WLM}$$

$$= 0.2 \text{ WLM}$$

$\therefore$  Jumlah kepekatan radon (Rn-222) untuk 1 mSv setahun di tempat kerja

$$\text{WLM per Bq m}^{-3} = 1.26 \times 10^{-3}$$

$$1.26 \times 10^{-3} \text{ WLM} = 1 \text{ Bq m}^{-3}$$

$$\frac{0.2 \text{ WLM}}{1.26 \times 10^{-3} \text{ WLM}} = \frac{x \text{ Bq m}^{-3}}{1 \text{ Bq m}^{-3}}$$

$$x = 158.7 \text{ Bq m}^{-3}$$

$$\approx \underline{200 \text{ Bq m}^{-3}}$$

viii. Untuk pekerja sinaran di tempat kerja dengan menggunakan had **20 mSv setahun**:

$$\frac{4 \text{ WLM}}{1.26 \times 10^{-3} \text{ WLM}} = \frac{x \text{ Bq m}^{-3}}{1 \text{ Bq m}^{-3}}$$

$$x = 3,1746.6 \text{ Bq m}^{-3}$$

$$\approx \underline{3000 \text{ Bq m}^{-3}}$$

b) Anak Toron

i. Pekali Penukaran  $\sim 1.4\text{mSv/mJ.h m}^{-3}$

$$\begin{aligned}\therefore 1 \text{ mSv} &= 0.71 \text{ m.J.h m}^{-3} \\ 20 \text{ mSv} &\approx 14 \text{ m.J.h m}^{-3} \\ &\approx 14 \text{ m.J.h m}^{-3} \times 0.25 \text{ WLM / m.J.h m}^{-3} \\ &\approx 4 \text{ WLM (1WLM = 5 mSv)}\end{aligned}$$

ii. Pengambilan Had Tahunan (*Annual Limit Intake, ALI*) bagi Rn-220 = 0.051 J

$$\begin{aligned}\text{Kadar pernafasan} &= 0.02 \text{ m}^3/\text{minit} \\ &= 0.02 \times 60 \text{ m}^3 \text{ per jam} \\ &= 1.2 \text{ m}^3 \text{ per jam (m}^3/\text{h)}\end{aligned}$$

iii. Isipadu udara pernafasan setahun =  $0.02 \text{ m}^3/\text{minit} \times 60 \text{ minit} \times 2000 \text{ jam}$   
(*working time*)  
 $= 2,400 \text{ m}^3$

iv. *Derived Activity Concentration (DAC)*;

$$\begin{aligned}\text{DAC} &= \frac{\text{ALI}}{2400 \text{ m}^3} = \frac{0.051 \text{ J. m}^{-3}}{2400 \text{ m}^3} \\ &= 2.1 \times 10^{-5} \text{ J m}^{-3} \\ 1 \text{ WL} &= 2.1 \times 10^{-5} \text{ J m}^{-3}\end{aligned}$$

v. Had Pendedahan Tahunan (*Annual Limit of Exposure, ALE*)

$$\begin{aligned}\text{ALE} &= \frac{\text{ALI}}{\text{Kadar pernafasan}} \\ &= \frac{0.051 \text{ J}}{1.2 \text{ m}^3 \text{ per jam}} \\ &= 0.0425 \text{ J. h m}^{-3} \\ 1 \text{ WLM} &= 3.54 \text{ m. J. h m}^{-3} \\ \therefore 0.0425 \text{ J. h m}^{-3} &\approx \frac{0.0425 \text{ J. h m}^{-3}}{3.54 \text{ m. J. h m}^{-3}} \\ &\approx 12 \text{ WLM (untuk pekerja)}\end{aligned}$$

vi. Dos Penukaran di tempat kerja

$$\begin{aligned}1.5 \text{ mSv per WLM} \\ \therefore 12 \text{ WLM} &= 18 \text{ mSv /tahun} \approx 20 \text{ mSv /tahun}\end{aligned}$$

vii. Untuk orang awam di tempat kerja dengan menggunakan had **1 mSv setahun**:

$$\begin{aligned}1 \text{ WLM} &= 1.5 \text{ mSv} \\ \therefore 12 \text{ WLM} &= 18 \text{ mSv} \\ 12 \text{ WLM} &\approx 20 \text{ mSv} \\ 1 \text{ mSv} &= 1/20 \text{ mSv} \times 12 \text{ WLM} \\ &= 0.6 \text{ WLM}\end{aligned}$$

$\therefore$  Jumlah kepekatan toron (Rn-220) untuk 1 mSv setahun di tempat kerja

$$\begin{aligned}\text{WLM per Bq m}^{-3} &= 1.26 \times 10^{-3} \\ 1.26 \times 10^{-3} \text{ WLM} &= 1 \text{ Bq m}^{-3} \\ \frac{0.6 \text{ WLM}}{1.26 \times 10^{-3} \text{ WLM}} &= \frac{x \text{ Bq m}^{-3}}{1 \text{ Bq m}^{-3}} \\ x &= 476.2 \text{ Bq m}^{-3} \\ &\approx \underline{500 \text{ Bq m}^{-3}}\end{aligned}$$

viii. Untuk pekerja sinaran di tempat kerja dengan menggunakan had **20 mSv setahun**:

$$\begin{aligned}\frac{12 \text{ WLM}}{1.26 \times 10^{-3} \text{ WLM}} &= \frac{x \text{ Bq m}^{-3}}{1 \text{ Bq m}^{-3}} \\ x &= 9,523.8 \text{ Bq m}^{-3} \\ &\approx \underline{9000 \text{ Bq m}^{-3}}\end{aligned}$$