

**PAPARAN RADIASI GAMMA DALAM LIMBAH
TENORM PADA INDUSTRI MINYAK DAN GAS BUMI**

**Di Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi
BATAN Jakarta**

SKRIPSI

Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Sains
dalam bidang fisika

Oleh:

DEWI LUTFI AZIZAH
0510930018-93



JURUSAN FISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN

ALAM

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

MALANG

2011

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

**PAPARAN RADIASI GAMMA DALAM LIMBAH TENORM
PADA INDUSTRI MINYAK DAN GAS BUMI
Di Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi
BATAN Jakarta**

oleh :
DEWI LUTFI AZIZAH
0510930018-93

Setelah dipertahankan di depan Majelis Penguji
pada tanggal
dan dinyatakan memenuhi syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Sains dalam bidang fisika

Pembimbing I

Pembimbing II

Drs. Unggul P. Juswono, M.Sc
NIP. 196501111990021002

Drs. Bunawas, APU
NIP. 195608071986021001

Mengetahui,
Ketua Jurusan Fisika
Fakultas MIPA Universitas Brawijaya

Adi Susilo, Ph.D
NIP. 196312271991031002

LEMBAR PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Dewi Lutfi Azizah
NIM : 0510930018
Jurusan : Fisika
Penulis skripsi berjudul :

**PAPARAN RADIASI GAMMA DALAM LIMBAH
TENORM PADA INDUSTRI MINYAK DAN GAS BUMI
Di Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi
BATAN Jakarta**

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Tugas Akhir ini adalah benar-benar karya saya sendiri, dan bukan hasil plagiat dari karya orang lain. Karya-karya yang tercantum dalam Daftar Pustaka TA ini, semata-mata digunakan sebagai acuan / referensi.
 2. Apabila kemudian hari diketahui bahwa isi TA saya merupakan hasil plagiat, maka saya bersedia menanggung akibat hukum dari keadaan tersebut.
- Demikian pernyataan ini dibuat dengan segala kesadaran.

Malang,
Yang menyatakan,

(Dewi Lutfi Azizah)
NIM. 0510930018

PAPARAN RADIASI GAMMA DALAM LIMBAH TENORM PADA INDUSTRI MINYAK DAN GAS BUMI

Di Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi
BATAN Jakarta

ABSTRAK

NORM (*Naturally Occurring Radioactive Material*) adalah bahan radioaktif yang sudah ada di alam atau biasa disebut dengan radioaktif alam. TENORM (*Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*) merupakan bahan radioaktif alam yang terkonsentrasi akibat proses industri. Salah satu sektor industri non nuklir yang berpotensi sebagai sumber TENORM adalah industri minyak dan gas bumi. TENORM dapat memberikan kontribusi pajanan atau paparan radiasi eksternal maupun internal terhadap lingkungan di sekitarnya. Oleh karena itu pengawasan dan pengelolaan TENORM perlu dilakukan, sehingga dapat dilakukan tindakan proteksi radiasi apabila sudah melebihi batas dosis yang telah ditentukan.

Berdasarkan data hasil penelitian, laju dosis gamma pada limbah TENORM memiliki kisaran nilai sebesar $142,93 \pm 0,05 \mu\text{R/h}$ sampai dengan $152,91 \pm 0,02 \mu\text{R/h}$. Laju dosis gamma berdasarkan hasil perhitungan secara teori memiliki nilai 27–31% lebih besar dibandingkan dengan nilai laju dosis gamma berdasarkan pengukuran secara langsung. Dari hasil pengukuran yang diperoleh, nilai laju dosis gamma yang terukur dapat dikatakan cukup tinggi, dimana batasan untuk dilakukan tindakan intervensi apabila konsentrasi aktivitas ^{226}Ra dan ^{232}Th lebih dari 1000 Bq/kg, ^{40}K lebih dari 10.000 Bq/kg dan menurut API (*Asosiasi Perminyakan Amerika Serikat*), batas tindakan (*action level*) untuk paparan radiasi eksternal sebesar $0,5 \mu\text{Sv/h}$ atau setara dengan $50 \mu\text{R/h}$.

Kata kunci : NORM, TENORM, Paparan radiasi gamma

GAMMA RADIATION EXPOSURE TENORM WASTE IN ON OIL AND GAS INDUSTRY

At the Technology Center of Radiation Safety and Metrology
BATAN Jakarta

ABSTRACT

NORM (*Naturally Occurring Radioactive Material*) is radioactive material that already exists in nature or referred to the radioactive nature. TENORM (*Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*) is a natural radioactive material is concentrated due to industrial processes. One of the non-nuclear industrial sector that has potential as a source TENORM is oil and gas industry. TENORM can contribute to radiation exposure to external or internal to the surrounding environment. Therefore TENORM supervision and management need to be done, so it can be done if the radiation protection measures already exceed the dose limits have been determined.

Based on research data, the gamma dose rate in the range of waste TENORM have a value of $142.93 \pm 0.05 \mu\text{R/h}$ to $152.91 \pm 0.02 \mu\text{R/h}$. Gamma dose rate based on the results of theoretical calculations has a value of 27-31% greater than the value of gamma dose rate based on direct measurement. From the measurement results obtained, the value of the measured gamma dose rates can be quite high. where the limits to intervention action is taken when the concentration of ^{226}Ra and ^{232}Th activity more than 1000 Bq/kg, ^{40}K more than 10,000 Bq/kg and according to the United States Petroleum Association (API), the boundary action (action level) for external radiation exposure of $0.5 \mu\text{Sv/h}$, equivalent to $50 \mu\text{R/h}$.

Keywords: NORM, TENORM, Gamma radiation exposure

KATA PENGANTAR

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Alhamdulillahirobbilalamin, segala puji syukur kehadiran Allah SWT dan kepada junjungan Nabi kita Muhammad SAW atas rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir dengan judul “Paparasi Radiasi Gamma dalam Limbah TENORM pada Industri Minyak dan Gas Bumi” di Pusat Penelitian dan Pengembangan Keselamatan Radiasi dan Biomedika Nuklir, BATAN Jakarta dengan sebaik-baiknya.

Keberhasilan penulis dalam menyelesaikan pelaksanaan penelitian serta dalam penyusunan laporan Tugas Akhir ini tidak lepas dari bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan banyak terima kasih kepada:

1. Orang tua dan keluarga tercinta yang telah memberikan banyak doa dan dukungan.
2. Bapak Adi Susilo, selaku Ketua Jurusan Fisika, Fakultas MIPA Universitas Brawijaya.
3. Bapak Unggul P. Juswono selaku Dosen Pembimbing I, yang selalu menyempatkan waktunya untuk memberikan pelajaran, bimbingan dan pengarahan kepada penulis.
4. Bapak Bunawas selaku Dosen Pembimbing II, yang telah memberikan motivasi, inspirasi, dan bantuannya yang banyak selama ini.
5. Bapak Muji Wiyono, Bapak Wahyudi, Bapak Asep Warsona, Bapak Asep Setiawan, Bapak Salimun dan seluruh staf kerja di PTKMR BATAN atas segala bantuan dan pelajaran yang berharga.
6. Seluruh dosen pengajar dan staf Tata Usaha Jurusan Fisika atas segala bantuannya.
7. Seluruh teman Fisika 2005 Univeritas Brawijaya yang telah memberikan kenangan, semoga kebersamaan yang sebentar ini tidak menghapus jejak yang kita lalui bersama.
8. Sahabat-sahabat yang memberikan inspirasi, dan semua pihak yang telah membantu, yang tidak bisa penulis sebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa tentunya masih ada kekurangan dalam penulisan Tugas Akhir ini. Kritik dan saran sangat diharapkan untuk perbaikan selanjutnya. Semoga penelitian ini diberikan berkah hingga banyak memberikan manfaat pada kita semua, Amin.

Malang, Juni 2010

Penulis

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERNYATAAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Radioaktivitas	5
2.1.1 Peluruhan	5
2.1.2 Waktu paro	6
2.1.3 Aktivitas radioaktif	7
2.2 Radiasi Pengion	9
2.2.1 Sinar alfa (α)	10
2.2.2 Sinar beta (β)	11
2.2.3 Sinar gamma (γ)	11
2.3 Satuan dan Dosimetri Radiasi	13
2.3.1 Dosis serap	13
2.3.2 Dosis ekuivalen	13

2.3.3	Dosis efektif	14
2.3.4	Paparan radiasi	15
2.4	Sumber-Sumber Radiasi Lingkungan	16
2.4.1	Radiasi alam	16
2.4.2	Radiasi buatan	17
2.5	NORM dan TENORM	18
2.6	TENORM pada Industri Minyak dan Gas Bumi	21
2.6.1	Karakteristik TENORM pada industri minyak dan gas bumi	22
2.6.2	Konsentrasi NORM pada industri minyak dan gas bumi	23
2.7	Aspek Proteksi Radiasi TENORM	25
2.7.1	Paparan radiasi eksternal	25
2.7.2	Paparan radiasi interna	27
2.7.3	Praktek tindakan proteksi radiasi	27
2.8	Pemantauan Radiasi (Surveimeter Radiasi)	28
2.8.1	Detektor ionisasi gas	29
2.8.1.1	Detektor kamar ionisasi	32
2.8.1.2	Detektor proporsional	32
2.8.1.3	Detektor geiger muller	32
2.8.2	Detektor sintilasi	32
2.8.3	Detektor semikonduktor	33

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

3.1	Waktu dan Tempat Penelitian	35
3.2	Alat dan Bahan	35
3.3	Rancangan Penelitian	35
3.4	Alur Penelitian	36
3.5	Metode Pengambilan Data	37
3.5.1	Persiapan bahan (sampel)	37
3.5.2	Pengukuran secara langsung paparan radiasi gamma pada limbah TENORM	38

3.5.3	Perhitungan paparan radiasi gamma pada limbah tenorm berdasarkan teori	39
3.6	Analisis Data dan hasil	40
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		
4.1	Data Hasil Penelitian dan Analisis	41
4.1.1	Data pengukuran pada limbah TENORM (kondisi kering)	41
4.1.2	Data pengukuran pada limbah TENORM (kondisi basah)	43
4.2	Data Laju Dosis Gamma secara Teori	49
4.2.1	Laju dosis gamma berdasarkan JAERI	49
4.2.2	Laju dosis gamma berdasarkan IAEA	51
4.3	Data Variasi Nilai Laju Dosis Gamma pada alat Surveimeter	53
4.4	Analisis Keselamatan	56
4.5	Pengelolaan Limbah TENORM dalam Industri Minyak dan Gas Bumi secara Umum	58
BAB V PENUTUP		
5.1	Kesimpulan	61
5.2	Saran	61
DAFTAR PUSTAKA		63
LAMPIRAN – LAMPIRAN		65

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

NORM (*Naturally Occurring Radioactive Material*) merupakan bahan radioaktif alam. NORM terdapat di mana-mana, karena hampir semua bahan alami seperti udara, air, tanah, tanaman, bahkan di dalam tubuh kita banyak mengandung bahan radioaktif alami. Hampir semua yang ada di alam mempunyai sejumlah kecil radioaktivitas alam. Aktivitas beberapa industri yang menggunakan sumber dari alam tanpa disadari akan meningkatkan tingkat radionuklida alam di lingkungan.

Beberapa industri non nuklir yang memanfaatkan bahan baku dari dalam bumi, seperti industri minyak dan gas bumi, pupuk fosfat dan potasium, industri pertambangan, PLTU, serta industri air minum dalam kemasan, merupakan sektor industri yang berpotensi menghasilkan sumber NORM. Hal ini disebabkan radionuklida alam yang terkandung di dalam batuan pada kulit bumi selama proses kegiatan pengolahan dan pemanfaatannya ikut termobilisasi. Bahan radionuklida alam tersebut akan terkonsentrasi membentuk produk samping berupa limbah radioaktif yang disebut *Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials* atau biasa disebut TENORM (Heaton, 1995).

TENORM terbentuk melalui suatu proses industri. Salah satu contoh adalah kegiatan di bidang Industri minyak dan gas bumi. Mulai dari tahapan eksplorasi, eksploitasi, pengolahan, hingga sampai distribusi, bahan radioaktif yang tersimpan di dalam formasi bumi akan ikut tereksplorasi bersama dengan minyak dan gas bumi. TENORM terbawa ke permukaan sebagai produk samping yang bahan material seperti kerak air (*scale*) yang melekat pada pipa, residu, dan *sludge* (lumpur). Hal ini apabila terakumulasi dalam jumlah yang besar, maka akan sangat berbahaya bagi para pekerja dikarenakan paparan radiasi dari bahan radioaktif tersebut.

TENORM dapat memberikan kontribusi paparan atau paparan radiasi eksternal maupun internal terhadap lingkungan di sekitarnya, baik untuk para pekerja, maupun masyarakat yang ada di

sekitar lokasi industri. TENORM tidak dapat diidentifikasi secara mudah dengan panca indera manusia karena tidak mempunyai rasa, bau dan warna yang spesifik. Akan tetapi TENORM dapat dideteksi dan diidentifikasi keberadaannya dengan menggunakan detektor yang dapat mendeteksi radiasi yang dipancarkan oleh radionuklida yang terkandung di dalam TENORM. Untuk menghindari dampak radiologik ini, maka pengawasan dan pengelolaan TENORM perlu mendapat perhatian, karena radioaktif yang terkandung di dalam TENORM pada umumnya adalah radionuklida yang mempunyai umur paro yang sangat panjang.

Pengelolaan TENORM dan limbah radioaktif yang bertanggungjawab memerlukan implementasi dan pengukuran yang menghasilkan perlindungan kesehatan manusia dan lingkungan, karena pengelolaan limbah radioaktif yang tidak sesuai dapat menghasilkan efek yang merugikan bagi kesehatan manusia atau lingkungan baik sekarang maupun yang akan datang. Karena sifat alami limbah radioaktif mempunyai resiko paparan radiasi pengion, maka perlu adanya batasan paparan masyarakat dan pekerja terhadap radiasi pengion dan melindungi lingkungan dari pelepasan radioaktif sesuai dengan ketentuan nasional dan standar yang telah disepakati secara internasional.

Dari beberapa uraian di atas, maka perlu dilakukan sebuah kajian dan penelitian mengenai penanganan dampak paparan radiasi dari industri non-nuklir, khususnya pada industri minyak dan gas bumi. Semua ini perlu dilakukan agar keselamatan dan kesehatan para pekerja, masyarakat sekitar, serta kualitas lingkungan hidup manusia akan lebih terjamin.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana laju paparan radiasi (gamma) pada limbah TENORM di industri minyak dan gas bumi, batasan dosis radiasi yang harus ada pada industri non nuklir yang memiliki potensi menghasilkan TENORM, serta tindakan yang perlu dilakukan apabila melebihi batas dosis yang telah ditetapkan.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui besar laju paparan radiasi gamma pada limbah TENORM industri minyak dan gas bumi baik secara langsung maupun secara teori, sehingga dapat dilakukan tindakan proteksi radiasi apabila sudah melebihi batas dosis yang telah ditentukan.

1.4 Batasan Masalah

Untuk menghindari adanya beberapa penyimpangan dan kesalahpahaman dari tujuan penelitian, maka diberi batasan masalah antara lain penelitian ini terbatas pada bagaimana paparan radiasi gamma dalam limbah TENORM pada industri minyak dan gas bumi yang ada di fasilitas penelitian TENORM PTKMR-BATAN, penelitian ini terdiri dari pengukuran secara langsung paparan radiasi gamma dengan menggunakan alat surveimeter radiasi dalam dua kondisi yaitu pada kondisi basah dan kondisi kering. Untuk mendapatkan limbah TENORM kondisi basah pada penelitian ini dilakukan simulasi hujan buatan.

1.5 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian tentang Paparan Radiasi Gamma dalam Limbah TENORM di Industri Minyak dan gas bumi ini memiliki beberapa manfaat, diantaranya adalah dapat membantu melindungi lingkungan dari pelepasan radioaktivitas sesuai dengan ketentuan nasional dan standart internasional, serta menjaga kualitas lingkungan, khususnya pencemaran akibat proses industri.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Radioaktivitas

Radioaktivitas ditemukan oleh H. Becquerel pada tahun 1896. Radioaktivitas didefinisikan sebagai pemancaran sinar radioaktif secara spontan oleh inti - inti yang tidak stabil menjadi inti-inti yang lebih stabil. Proses perubahan ini disebut peluruhan radioaktif, sedangkan inti atom yang tidak stabil disebut radionuklida.

Besarnya radioaktivitas suatu unsur radioaktif (radionuklida) ditentukan oleh konstanta peluruhan (λ), yang menyatakan laju peluruhan tiap detik, dan waktu paro ($t_{1/2}$). Kecepatan pengurangan radionuklida selama proses perubahan inti atom disebut aktivitas radionuklida.

2.1.1 Peluruhan

Pada prinsipnya suatu bahan bersifat radioaktif dikarenakan inti atomnya tidak stabil, oleh karena itu inti atom akan secara terus-menerus meluruh hingga dicapai suatu keadaan inti baru yang stabil. Pemancaran radiasi secara terus-menerus sepanjang waktu dari inti radioaktif akan mengakibatkan berkurangnya jumlah inti atom radioaktif. Peristiwa penyusutan jumlah inti atom seperti inilah yang disebut peluruhan. Berkurangnya jumlah inti radioaktif akan disertai dengan berkurangnya jumlah radiasi yang dipancarkan. Laju peluruhan setiap zat radioaktif bergantung pada jenis zat radioaktifnya dan jumlah zat radioaktif mula-mula. Dalam hal ini setiap zat radioaktif mempunyai konstanta peluruhan (λ) sendiri-sendiri. Konstanta peluruhan didefinisikan sebagai fraksi zat radioaktif yang meluruh ($\Delta N/N$) tiap satuan waktu (Δt) yang dirumuskan sebagai berikut,

$$\frac{\Delta N/N}{\Delta t} = \lambda \quad (2.1)$$

Dengan mengintegrasikan persamaan (2.1) akan diperoleh jumlah zat radioaktif yang tersisa setiap saat seperti pada persamaan berikut ini,

$$\frac{\Delta N}{N} = \lambda \Delta t \quad (2.2)$$

$$\int_0^{N_t} \frac{dN}{N} = \int_0^t \lambda dt \quad (2.3)$$

Pengurangan jumlah zat radioaktif berlangsung secara eksponensial, sehingga jumlah zat radioaktif yang tertinggal setiap saat adalah :

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2.4)$$

dengan,

N_t = jumlah zat radioaktif setiap saat

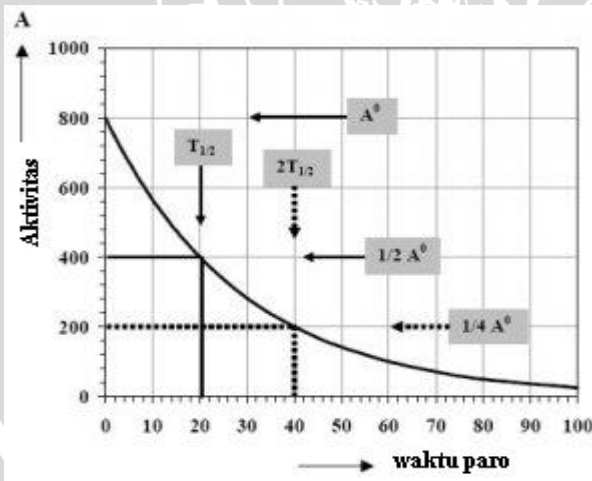
N_0 = jumlah zat radioaktif mula-mula

λ = konstanta peluruhan

t = waktu peluruhan

2.1.2 Waktu paro

Setiap zat radioaktif mempunyai waktu paro ($T_{1/2}$), yaitu waktu yang diperlukan oleh zat radioaktif untuk meluruh sehingga jumlah zat radioaktif dan aktivitasnya menjadi setengah dari zat radioaktif mula-mula. Gambar 2.1 menjelaskan hubungan antara jumlah zat radioaktif setiap saat (N_t) dengan waktu peluruhan (t) atau variasi antara aktivitas dan waktu.



Gambar 2.1 Grafik peluruhan zat radioaktif
(sumber : Mukhlis Akhadi, 2000)

Semakin pendek waktu paro, semakin cepat zat radioaktif tersebut meluruh, begitu juga sebaliknya semakin panjang waktu paronya, maka semakin lama umur zat radioaktif tersebut. Pada gambar tersebut dapat dilihat bahwa untuk satu kali waktu paro, aktivitas zat radioaktif akan tinggal separonya yaitu dengan $A = A / 2$ dan setelah tujuh kali waktu paro maka aktivitasnya akan menjadi kurang dari 1/100 bagian, di mana $A = A / 2 = A / 128$ dan begitu juga pada saat sepuluh kali waktu paro maka aktivitasnya akan menjadi 1/1000 bagian, di mana $A = A / 2 = A / 1024$.

Pada saat maka $N = -N$, maka untuk persamaan waktu paro suatu zat radioaktif adalah sebagai berikut (Akhadi, 2000)

$$\begin{aligned}
 N &= N e \\
 -N &= N e T / \\
 \ln - &= \ln e T / \\
 0 - 0,0693 &= -\lambda T / \\
 / &= \frac{0,693}{T} \text{ atau } = 0,69 / \quad (2.5)
 \end{aligned}$$

Waktu paro zat radioaktif bervariasi antara satu zat dengan zat yang lainnya, nilainya berkisar dari orde mikro detik sampai jutaan tahun.

2.1.3 Aktivitas radioaktif

Pancaran radiasi sifatnya sama dengan pancaran cahaya yaitu menyebar ke segala arah. Banyaknya partikel yang dipancarkan oleh suatu sumber radiasi per satuan waktu disebut ukuran intensitas atau aktivitas suatu sumber radiasi. Banyaknya partikel yang dipancarkan per satuan waktu sering juga dinamakan dengan peluruhan per satuan waktu. Satuan untuk aktivitas sumber radiasi adalah 1 becquerel, nama becquerel diambil dari Henry Becquerel yaitu orang pertama yang menemukan gejala radioaktivitas.

1 becquerel (Bq) = 1 peluruhan per detik

Satuan becquerel (Bq) ini dipakai dalam satuan SI, satuan lain untuk intensitas sumber radiasi adalah curie atau disingkat dengan Ci. Satu curie didenifinisikan sebagai :

1 curie (Ci) = $3,7 \times 10^{10}$ peluruhan per detik

Besaran ini merupakan ukuran aktivitas inti atom radioaktif yang menyatakan banyaknya peluruhan yang terjadi tiap detik. Pada umumnya untuk intensitas radiasi yang tinggi digunakan satuan curie, sedangkan untuk intensitas rendah digunakan satuan becquerel. Hubungan antara satuan becquerel dan satuan curie adalah sebagai berikut (Yudhi, 2007):

$$1\text{mCi} = 10^{-3} \text{ dan } 1\mu\text{Ci} = 10^{-6} \text{ Ci}$$

$$1 \text{ curie (Ci)} = 3,7 \times 10^{10} \text{ becquerel (Bq)}$$

$$1 \text{ becquerel (Bq)} = 27,027 \times 10^{-12} \text{ curie (Ci)}$$

Satu curie dapat diasumsikan sebagai ukuran aktivitas per 1 gram dari inti atom radioaktif, dimana konsentrasi radioaktif di tanah dapat dinyatakan kedalam Bq/kg atau pCi/g, kedua satuan dapat dihubungkan menjadi (IAEA, 1989):

$$1 \text{ pCi/g} = 37 \text{ Bq/kg}$$

Aktifitas zat radioaktif (A) hanya menunjukkan jumlah inti radioaktif yang melakukan peluruhan, tetapi tidak menunjukkan jumlah radiasi yang dipancarkannya. Aktivitas dari suatu zat radioaktif dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$A = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N \tag{2.6}$$

dengan,

- A = aktivitas zat radioaktif (Bq)
- λ = konstanta peluruhan
- N = jumlah atom radioaktif

Jumlah atom radioatif selalu berkurang setiap saat karena terjadinya peluruhan. Dengan demikian, aktivitas zat radioatif akan selalu berkurang setiap saat. Dari persamaan (2.4) dan (2.5) diperoleh :

$$N = N e^{-\lambda t}$$

$$\lambda N = \lambda N e^{-\lambda t}$$

$$A = A e^{-\lambda t} \tag{2.7}$$

dengan mensubstitusikan persamaan (2.5) ke persamaan (2.7), maka akan diperoleh persamaan baru seperti pada persamaan (2.8) berikut ini,

$$\begin{aligned}
 A &= A_0 e^{-\lambda t} \\
 A &= A_0 e^{-\ln 2 t / T_{1/2}} \\
 A_t &= A_0 e^{-0,0693 t / T_{1/2}} \\
 A &= A_0 (1/2)^{t / T_{1/2}} \\
 &= A_0 (1/2)^n
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

dengan,

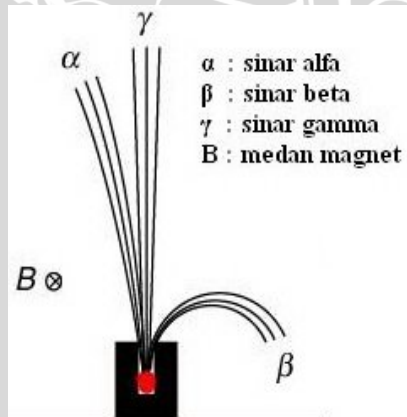
$$n = t / T_{1/2}$$

A = aktivitas zat radioaktif setelah waktu t

A₀ = aktivitas zat radioaktif mula-mula

2.2 Radiasi Pengion

Berdasarkan sifatnya, radiasi dibedakan menjadi dua jenis, yaitu radiasi pengion dan radiasi non pengion. Radiasi pengion adalah jenis radiasi yang dapat menyebabkan proses ionisasi (terbentuknya ion positif dan ion negatif) apabila berinteraksi dengan materi, yang termasuk radiasi pengion adalah sinar alfa (α), sinar beta (β), sinar gamma (γ), sinar-x dan partikel neutron. Beberapa jenis radiasi pengion dapat dilihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Jenis radiasi pengion
(sumber: Irving Kaplan, 1979)

Radiasi non pengion adalah jenis radiasi yang tidak akan menyebabkan efek ionisasi apabila berinteraksi dengan materi, yang termasuk dalam jenis radiasi non pengion antara lain adalah gelombang radio, gelombang mikrowave, sinar inframerah, cahaya tampak, dan sinar ultraviolet yang dipancarkan matahari.

2.2.1 Sinar alfa (α)

Sinar- α merupakan partikel dengan muatan listrik +2 dan memiliki massa 4 sma. Sinar- α adalah inti atom Helium ${}^4_2\text{He}$. Jika inti atom memancarkan sinar- α , maka akan dihasilkan inti baru dengan nomor atom inti akan berkurang 2 dan nomor massanya juga berkurang 4. Sesuai dengan hukum kekekalan nomor atom dan nomor massa, Persamaan reaksi pemancar alfa dapat ditulis sebagai berikut (Akhadi, 2000):



dengan X adalah inti yang melakukan peluruhan dan Y adalah inti hasil peluruhan, serta Z adalah nomor massa, dan A adalah nomor atom. Inti radioaktif dengan nomor atom dan nomor massa tinggi pada umumnya merupakan inti radioaktif pemancar sinar- α . Berikut adalah beberapa contoh peluruhan inti atom radioaktif pemancar sinar- α ,



Partikel alfa (α) mempunyai daya ionisasi yang cukup tinggi akan tetapi daya tembus terhadap suatu materi rendah, oleh karena itu dapat ditahan oleh selembar kertas biasa. Daya tembusnya sekitar 1/100 dari daya tembus sinar beta (β). Apabila partikel alfa (α) terpancar di udara dalam beberapa cm, partikel α akan bertabrakan dengan molekul udara dan akan kehilangan energi kinetik, yang akhirnya akan membentuk atom helium yang netral. Partikel alfa (α) mempunyai kemampuan mengionkan gas dan memiliki kecepatan yang lebih rendah bila dibandingkan dengan sinar beta (β) dan sinar

gamma (γ). Potensi bahaya radiasi tinggi (radiotoksik) dari sinar alfa (α) adalah ketika partikel alfa (α) masuk ke dalam tubuh manusia.

2.2.2 Sinar beta (β)

Sinar- β merupakan partikel dengan muatan listrik $-1e$ dan diberi notasi ${}^0_{-1}\beta$. Kecepatan sinar- β mendekati kecepatan cahaya. Sinar- β mempunyai 3 jenis proses pemancaran, yaitu pemancaran elektron, pemancaran positron, dan penangkapan elektron. Persamaan reaksi pemancar sinar- β adalah sebagai berikut:

a. pemancaran elektron



b. pemancaran positron



c. penangkapan elektron



Daya tembus partikel β lebih besar dibanding dengan partikel alfa, dan karena massanya yang ringan partikel β akan dibelokkan ketika melewati suatu bahan karena gaya tarik inti. Partikel β dapat ditahan oleh selembur aluminium.

2.2.3 Sinar gamma (γ)

Sinar gamma (γ) merupakan radiasi elektromagnet yang tidak bermassa dan tidak bermuatan sehingga diberi notasi 0_0 . Sinar gamma dihasilkan oleh transisi energi inti atom dari suatu keadaan eksitasi ke keadaan dasar dan dipancarkan sebagai suatu cara bagi inti radioisotop untuk melepaskan kelebihan energi untuk menjadi inti yang stabil. Sinar- γ biasanya dipancarkan mengikuti peluruhan alfa dan beta. Sinar- γ bukan sebuah partikel sehingga tidak memiliki nomor atom ($A = 0$) maka dalam peluruhan sinar γ tidak dihasilkan inti atom baru. Persamaan peluruhan sinar- γ dapat ditulis sebagai berikut:



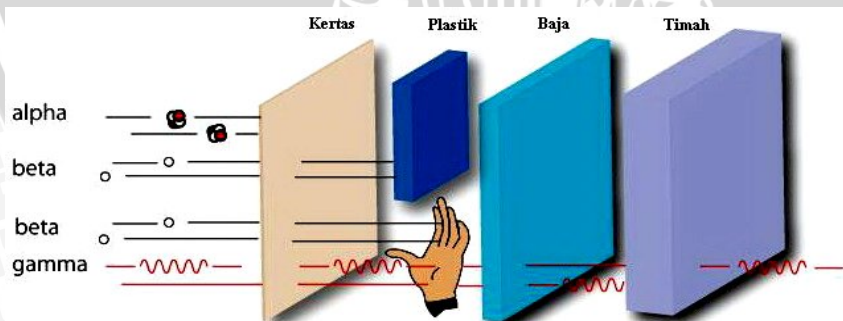
Adapun sifat dasar dari sinar- γ yaitu memiliki daya tembus paling besar tetapi daya ionisasinya paling lemah, dan kecepatan

sinar- γ bernilai sama dengan kecepatan cahaya di ruang hampa. Pada Tabel 2.1 berikut ini dapat dilihat beberapa karakteristik dari sinar- α , sinar- β maupun sinar- γ .

Tabel 2.1 Karakteristik sinar α , β dan γ (Akhadi, 2000)

Karakteristik	Sinar- α	Sinar- β	Sinar- γ
Sifat material	partikel helium	partikel elektron	gelombang elektromagnetik
Simbol	α atau ${}^4_2\text{He}$	β atau ${}^0_{-1}e$	γ atau ${}^0_0\gamma$
Muatan	+2e	-1e ($1,61 \times 10^{-19}$ C)	0
Massa	4 sma	m_e ($9,11 \times 10^{-31}$ kg)	0
Diserap oleh	selembar kertas	selembar aluminium	selembar timbal
Daya ionisasi	lemah	cukup kuat	sangat kuat
Daya tembus	kecil	besar	tidak ada
Kecepatan	0,05 – 0,07 c	0,3 – 0,9 c	0,99 – 1 c

Salah satu sifat dari sinar radioaktif adalah memiliki daya tembus yang tinggi. Kekuatan tembus sinar-sinar radioaktif ini dipengaruhi oleh daya ionisasinya. Pada Gambar 2.3 berikut ini dijelaskan mengenai daya tembus setiap sinar radioaktif,



Gambar 2.3 Daya tembus beberapa radiasi pengion

(sumber : Anonimous, 2009)

2.3 Satuan dan Dosimetri Radiasi

Dalam proteksi radiasi, metode pengukuran dosis radiasi dikenal sebagai dosimetri radiasi. Sama halnya dengan besaran-besaran fisis lainnya. Satuan dan ukuran dalam radiasi menunjukkan besarnya paparan atau pancaran radiasi dari suatu sumber radiasi maupun banyaknya dosis radiasi yang diberikan atau diterima oleh suatu medium yang terkena radiasi. Beberapa satuan yang biasa digunakan dalam dosis radiasi adalah sebagai berikut (Alatas, 2007) :

- rontgen (R)
- *radiation absorbed dose* (rad)
- gray (Gy)
- *roentgen gen equivalent man* (Rem)
- sievert (Sv)

Berikut akan dipaparkan secara singkat mengenai besaran dan satuan dosimetrik dasar yang digunakan dalam proteksi radiasi.

2.3.1 Dosis serap

Radiasi dapat mengakibatkan ionisasi pada jaringan atau medium yang dilaluinya. Untuk mengukur besarnya energi radiasi yang diserap oleh medium digunakan besaran dosis serap. Dosis serap dapat dirumuskan dengan (Akhadi, 2000):

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (2.17)$$

dengan dE adalah energi yang diserap oleh medium bermassa dm . Satuan untuk dosis serap adalah (J/kg), dalam sistem SI dosis serap diberikan satuan khusus yaitu gray (Gy).

1 Gy = 1 J/kg ; dimana 1 rad = 0,01 J/kg

1 rad = 100 erg / gr bahan 0,01 J/kg bahan = 0,01 Gy

Laju dosis serap (dosis serap per satuan waktu) dalam SI dinyatakan dalam Gy/s atau Gy/ jam, dimana (IAEA, 1989) :

1 pGy/s = 0,414 μ R/h

2.3.2 Dosis ekuivalen

Dosis ekuivalen digunakan sebagai suatu ukuran efek biologi akibat terserapnya jenis radiasi tertentu atau dosis ekuivalen

menyatakan seberapa besar tingkat kerusakan sistem biologis yang mungkin ditimbulkan oleh suatu radiasi serta menunjukkan tingkat bahaya potensialnya. Dosis ekuivalen dihitung dengan mengalikan dosis serap pada suatu organ dan jaringan dengan faktor pembobot radiasi.

$$H_T = D_T \times W_R \tag{2.18}$$

keterangan,

H_T = dosis ekuivalen

D_T = dosis serap pada suatu organ atau jaringan

W_R = faktor bobot radiasi

Tabel 2.2 Faktor bobot radiasi (ICRP No.60 Tahun 1990)

Jenis dan rentang energi	Faktor bobot radiasi
Partikel alfa (α)	20
Partikel beta (β)	1
Sinar x dan sinar gamma (γ)	1
Neutron	
< 10 keV	5
10 keV sampai 100 keV	10
>100 keV sampai 2 MeV	20
>2 MeV sampai 20 MeV	10
>20 MeV	5

Dosis ekuivalen mempunyai satuan khusus yaitu sievert (Sv) sebagai satuan SI, untuk membedakan dari dosis serap.

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J/kg}$$

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ Rem}$$

2.3.3 Dosis efektif

Untuk menunjukkan keefektifan radiasi dalam menimbulkan efek tertentu pada suatu organ atau jaringan diperlukan besaran yang disebut besaran dosis efektif. Besaran ini merupakan penurunan dari besaran dosis ekuivalen.

Dosis efektif (H_E) pada suatu jaringan atau organ ditentukan dengan mengalikan dosis ekuivalen (H_T) dengan faktor pembobot jaringan (W_T),

$$H_E = H_T \times W_T \tag{2.19}$$

Faktor bobot jaringan (W_T) digunakan untuk mempertimbangkan radiosensitivitas dari organ-organ atau jaringan yang berbeda. Karena faktor bobot jaringan tidak berdimensi, maka satuan dosis efektif sama dengan satuan dosis ekuivalen yaitu Sv dan Rem. Pada Tabel 2.3 berikut ini dapat dilihat besarnya nilai faktor bobot jaringan.

Tabel 2.3 Faktor bobot jaringan (ICRP No.60 Tahun 1990)

Jaringan	Faktor bobot radiasi (W_T)
<i>Gonad</i>	0.20
Sumsum tulang merah	0.12
Usus besar	0.12
Paru-paru	0.12
Lambung	0.12
Payudara	0.05
Hati	0.05
<i>Oesophagus</i>	0.05
Kandung kemih	0.05
Kelenjar gondok	0.05
Kulit	0.01
Permukaan tulang	0.01
Organ sisa	0.05

2.3.4 Paparan radiasi

Paparan radiasi dalam pekerjaan dapat terjadi akibat dari berbagai aktivitas manusia, termasuk pekerjaan yang berhubungan dengan tahap-tahap pengelolaan siklus bahan bakar nuklir, pemanfaatan sumber radioaktif, pesawat sinar-X, penelitian ilmiah, pertanian dan industri, serta pekerjaan lain yang berkaitan dengan penanganan bahan mineral yang mengandung radionuklida alam berkonsentrasi tinggi. Istilah paparan radiasi digunakan untuk menyatakan paparan atau pancaran radiasi yang diterima oleh suatu medium yang terkena radiasi (BATAN, 2005).

Paparan pada mulanya didefinisikan sebagai intensitas sinar-x yang dapat menghasilkan ionisasi di udara dalam jumlah tertentu. Sehingga paparan (X) dapat dirumuskan dengan,

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (2.20)$$

dengan dQ adalah jumlah muatan elektron yang timbul sebagai akibat interaksi antara foton dengan atom-atom udara dalam volume udara yang bermassa dm . satuan paparan adalah roentgen disingkat dengan (R).

Pada tahun 1937 satuan untuk paparan radiasi didefinisikan ulang, sehingga berlaku juga untuk sinar gamma, yaitu bahwa 1 R merupakan kuantitas radiasi foton yang menghasilkan 1 esu ion positif atau negatif di dalam 1 cm³ udara normal (NPT), dari definisi ulang tersebut dapat ditentukan bahwa (Ruslanto, 2005),

$$1 \text{ R} = 7,083 \times 10^{10} \text{ eV/cm}^3 \text{ udara (NPT)}$$

$$1 \text{ R} = 0,00877 \text{ J/kg (udara)}$$

2.4 Sumber-Sumber Radiasi Lingkungan

Berdasarkan asalnya, sumber radiasi di lingkungan dapat dikelompokkan menjadi dua golongan, yaitu sumber radiasi alam dan sumber radiasi buatan. Sumber radiasi alam sudah ada sejak alam semesta terbentuk sedangkan sumber radiasi buatan sengaja dibuat untuk tujuan tertentu.

2.4.1 Radiasi alam

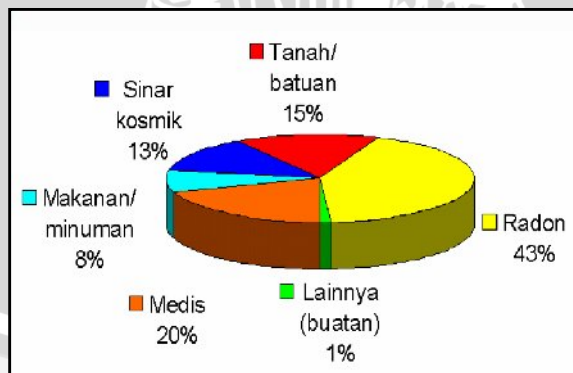
Unsur-unsur radioaktif alam dapat berperan sebagai sumber radiasi alam. Radiasi yang dipancarkan oleh sumber radiasi alam disebut juga sebagai radiasi latar. Secara garis besar ada 3 sumber radiasi lingkungan yang berasal dari alam, yaitu radiasi kosmik, radiasi terrestrial (primordial), dan radiasi dari dalam tubuh manusia.

Radiasi kosmik terdiri atas sinar dan partikel. Sebagian besar sinar kosmik diserap oleh 1/10 atmosfer bagian atas (sinar kosmik primer) dan ± 20 km di bawahnya berupa sinar kosmik sekunder. Di permukaan bumi, sinar kosmik sekunder terdiri atas meson, elektron, foton serta neutron dan proton. Sinar kosmik umumnya memiliki daya tembus yang relatif sangat kuat. Sinar ini dapat menembus

bangunan beton, batu-batuan dan bahkan dapat menembus lapisan bawah tanah hingga kedalaman 200 meter. Radiasi terestrial berasal dari radionuklida yang terjadi secara alamiah di dalam kerak bumi. Radionuklida ini disebut *primordial* dan mempunyai waktu paro dalam kurun waktu milyaran tahun (10^9). Radionuklida utama yang tergolong dalam radiasi primordial ini adalah ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th , dan ^{40}K . Tiga radionuklida pertama memiliki rantai peluruhan yang masing-masing dikenal sebagai deret Uranium, Actinium, dan Thorium. Sedangkan sumber radiasi dari dalam tubuh manusia berasal dari makanan dan minuman yang masuk ke dalam tubuh. Pada umumnya radionuklida yang ada pada makanan dan minuman adalah ^{40}K (Ruslanto, 2005).

2.4.2 Radiasi buatan

Selain unsur-unsur radioaktif alam, juga dikenal adanya unsur-unsur radioaktif buatan yang tersebar di lingkungan. Radioaktif dapat dibuat oleh manusia melalui proses fisi, proses aktivasi maupun proses transmudasi inti lainnya. Dengan memanfaatkan teknik-teknik tersebut bermacam-macam radionuklida dapat dibuat. Radionuklida buatan dapat memancarkan radiasi alpha, beta dan gamma. Unsur-unsur radioaktif buatan yang terlepas ke lingkungan dapat berperan sebagai sumber radioaktif buatan. Selain dari unsur-unsur radioaktif, radiasi buatan dapat juga berasal dari sumber-sumber lain seperti pesawat sinar-x, reaktor nuklir dan akselerator. Perbandingan radiasi alam dan radiasi buatan yang ada di lingkungan dapat digambarkan pada Gambar 2.4 berikut ini,



Gambar 2.4 Kontribusi sumber radiasi secara umum
(sumber: BATAN, 2009)

2.5 NORM dan TENORM

NORM (*Naturally Occurring Radioactive Material*) adalah radioaktif alam yang sudah disediakan oleh alam. NORM terdapat di mana-mana, di udara, air, tanah, tanaman bahkan di dalam makanan dan di dalam tubuh manusia mengandung bahan radioaktif alam. Kegiatan pada beberapa industri yang memanfaatkan bahan baku yang berasal dari dalam bumi dapat menyebabkan terjadinya peningkatan konsentrasi radionuklida alam. Hal ini disebabkan radionuklida alam yang terkandung dalam batuan pada kulit bumi selama proses kegiatan pengolahan dan pemanfaatannya termobilisasi, sehingga membentuk produk samping berupa bahan radioaktif. Bahan radioaktif yang terbentuk ini disebut dengan TENORM (*Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials*) (Heaton, 1995).

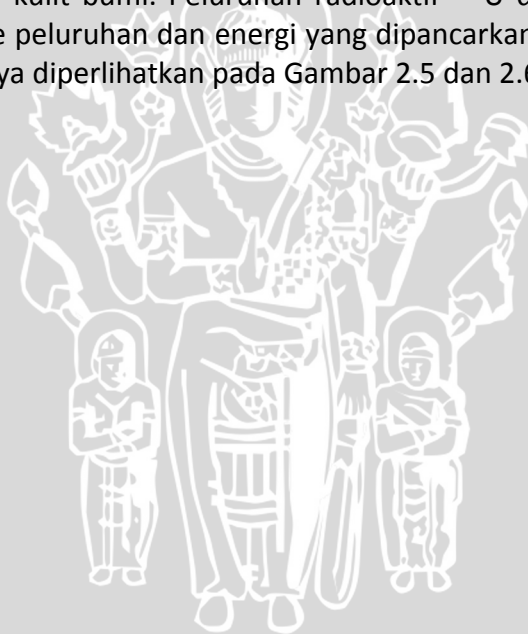
Sektor industri non nuklir yang berpotensi sebagai sumber TENORM adalah industri minyak dan gas bumi, pupuk fosfat, metal (besi, tembaga, aluminium, dan lain-lain), PLTU (batu bara dan panas bumi), dan industri air minum dalam kemasan. Jenis radionuklida alam yang ditemukan dalam NORM bergantung pada jenis kegiatan industri dan bahan baku yang digunakan industri tersebut.

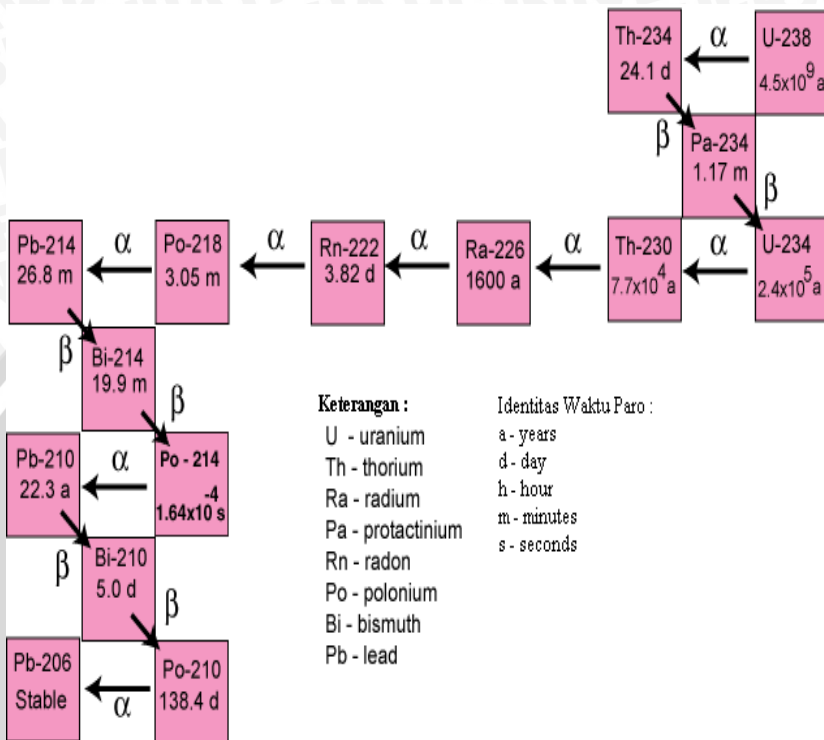
Tabel 2.4 Jenis – jenis radionuklida berdasarkan jenis industri
(Bunawas, 2005)

Industri sumber NORM	Radionuklida dominan
Pupuk fosfat	^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po
Pembangkit Listrik Tenaga Batubara	^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{232}Th , ^{228}Ra , ^{228}Th
Minyak dan Gas Bumi	^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{228}Ra , ^{228}Th , ^{222}Rn
Pengolahan Air Minum	^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{228}Ra

Penambangan Metal	^{238}U , ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{232}Th , ^{228}Ra , ^{228}Th
Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi	^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{222}Rn

Secara umum, radionuklida alam yang dominan ditemukan di dalam NORM adalah ^{238}U , ^{232}Th , ^{228}Th , ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{222}Rn , ^{220}Rn , ^{210}Pb dan ^{210}Po . Radiasi yang dipancarkan NORM merupakan campuran partikel alfa, beta dan photon gamma. Radon (^{222}Rn) dan thoron (^{220}Rn) adalah pemancar alpha murni dan berwujud gas. Radionuklida dalam TENORM berasal dari peluruhan radionuklida primordial dari peluruhan ^{238}U , ^{232}Th dan ^{40}K . Radionuklida alam ini banyak ditemukan dalam batuan dan mineral pada kulit bumi. Peluruhan radioaktif ^{238}U dan ^{232}Th dengan mode peluruhan dan energi yang dipancarkan beserta jenis radiasinya diperlihatkan pada Gambar 2.5 dan 2.6.

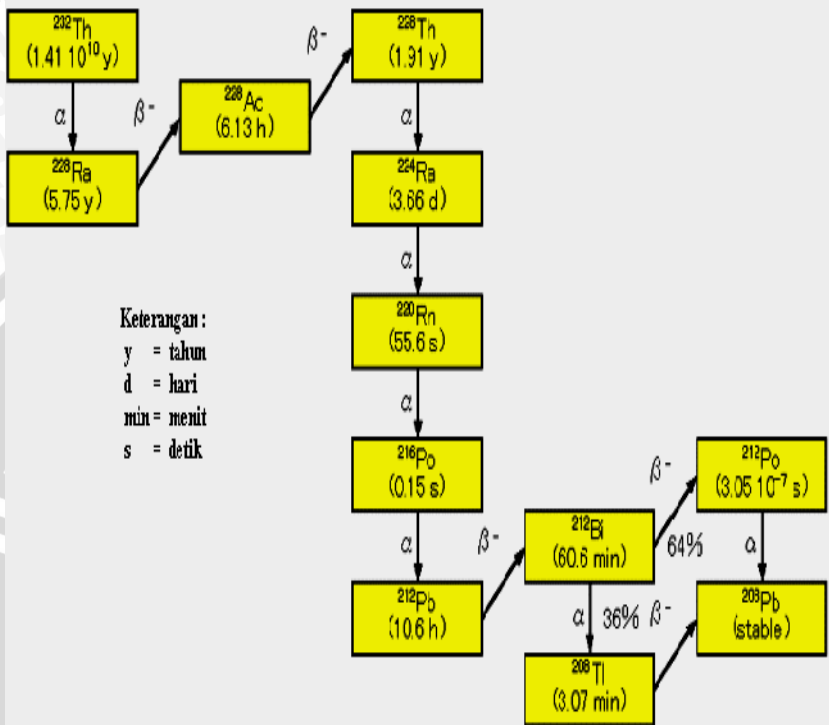




Gambar 2.5 Deret peluruhan uranium (^{238}U)
(sumber : BATAN, 2005)

Radionuklida alam uranium dan thorium banyak ditemukan dalam batu-batuan dan mineral pada kulit bumi. Uranium memiliki 16 isotop dan semua bersifat radioaktif. Di alam konsentrasi radioaktif terbesar adalah ^{238}U yang mencapai 99,28%, ^{235}U sebesar 0,71% dan ^{234}U sebesar 0,0054%. Uranium logam sangat padat dan berat, kepadatannya dapat mencapai 65%. Uranium ditemukan secara alami memiliki 3 isotop yang berbeda, yaitu ^{238}U , ^{235}U , dan ^{234}U . Semua isotop uranium adalah radioaktif.

Rantai peluruhan ^{232}Th sangat kompleks. Thorium di alam berbentuk lembut, putih seperti perak logam. Karena bentuknya yang sangat halus thorium banyak terdapat di udara. Waktu paro dari thorium dapat mencapai sekitar 14 milyar tahun.



Gambar 2.6 Deret peluruhan thorium (^{232}Th)
 (sumber : BATAN, 2005)

2.6 TENORM pada Industri Minyak dan Gas Bumi

TENORM dalam kegiatan industri minyak dan gas bumi terbentuk melalui suatu proses industri, yaitu mulai dari tahapan eksplorasi, eksploitasi dan pengolahan, hingga sampai distribusi. Karena kegiatan di dalam industri minyak dan gas bumi pada dasarnya merupakan kegiatan pengambilan dan pengolahan bahan baku dari alam, maka bahan radioaktif yang tersimpan di dalam formasi bumi akan ikut tereksploitasi bersama dengan minyak dan gas bumi. Radionuklida alam yang terlarut di dalam air produksi akan terkonsentrasi dan akhirnya membentuk material radioaktif yaitu berupa TENORM. Radioaktif yang teridentifikasi pada aliran minyak dan gas bumi adalah radionuklida yang berasal dari peluruhan radionuklida primordial ^{238}U , ^{232}Th dan ^{40}K . TENORM

dapat memberikan kontribusi pajanan radiasi eksterna maupun interna, apabila tidak dikelola dengan benar dapat menimbulkan dampak radiologik terhadap pekerja, masyarakat dan lingkungan hidup. Pada Tabel 2.5 berikut ini dapat dilihat radionulida spesifik dan dominan yang ditemukan di dalam TENORM (Bunawas, 2005).

Tabel 2.5 Karakteristik peluruhan radioaktif dari NORM pada industri minyak dan gas bumi (Bunawas, 2005)

Radionuklida	Umur paruh	Mode peluruhan	Hasil peluruhan utama
^{226}Ra	1600 tahun	alfa	^{222}Rn (gas mulia)
^{222}Rn	3,825 hari	alfa	^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi
^{210}Pb	22,3 tahun	beta	^{210}Pb
^{210}Po	138,4 hari	alfa	^{206}Pb stabil
^{228}Ra	5,75 tahun	beta	^{228}Th
^{228}Th	1,91 tahun	alfa	^{224}Ra
^{224}Ra	3,66 hari	alfa	^{220}Rn (gas mulia), ^{210}Pb , ^{212}Pb , ^{212}Bi

2.6.1 Karakteristik limbah TENORM pada industri minyak dan gas bumi

TENORM dapat terbentuk akibat terlarutnya isotop radium pada batu-batuan (seperti ^{226}Ra , ^{228}Ra , dan ^{224}Ra) di dalam air yang terdapat bersama minyak dan gas. TENORM yang terbentuk dapat berupa *scale* (kerak air) dan *sludge* (lumpur). Berdasarkan analisis TENORM pada industri minyak dan gas bumi diperoleh informasi bahwa endapan dalam bentuk kerak air dan lumpur tidak mengandung ^{232}Th dan ^{238}U , kedua unsur ini tidak termobilisasi bersama air formasi. Air formasi yang mengandung kation-kation dari unsur golongan II pada tabel periodik seperti kalsium (Ca), stronsium (Sr), barium (Ba) dan radium (Ra) bersifat mudah larut dalam air. Oleh karena itu, isotop ^{226}Ra dari deret peluruhan ^{238}U dan (^{228}Ra dan ^{224}Ra) dari deret peluruhan ^{232}Th , juga akan mudah larut.

Sebagai akibatnya ketiga isotop radium ini akan ikut terbawa pada waktu proses pengambilan minyak dan gas bumi.



Gambar 2.7 Sludge dan scale di dalam pipa produksi (sumber : Bunawas, 2005)

Karena pengaruh perubahan suhu, tekanan dan pH dalam proses pengambilan minyak, unsur-unsur radionuklida tersebut akan mengendap dalam bentuk senyawa-senyawa kompleks dalam bentuk kerak air dan lumpur pada alat produksi. Di dalam gas alam banyak ditemukan gas radon yang merupakan anak luruh dari ^{226}Ra . Pada tahap pemisahan minyak, gas dan air, radon akan mengikuti gas. Karena ^{228}Ra meluruh menjadi ^{228}Th dan ^{226}Ra meluruh menjadi ^{210}Pb melalui radon (^{222}Rn) maka di dalam kerak air banyak ditemukan ^{228}Th dan ^{210}Pb . Pengendapan kerak dapat berlangsung sangat lama sampai orde tahunan yang pada akhirnya dapat menurunkan bahkan menghentikan aliran fluida (jalannya proses produksi) dan mengakibatkan sistem operasi yang tidak aman. Karakteristik dan bentuk NORM pada industri minyak dan gas bumi dapat dilihat pada Tabel 2.6 berikut ini,

Tabel 2.6 NORM pada produksi minyak dan gas (Bunawas, 2005)

Tipe	Radionuklida	Karakteristik	Keberadaan
Kerak Ra	^{228}Ra , ^{226}Ra , ^{224}Ra dan hasil luruhannya	dalam bentuk endapan keras Ca, Sr, Ba Sulfat dan karbonat	bagian basah dari instalasi produksi dan pipa bor

Lumpur Ra	^{228}Ra , ^{226}Ra , ^{224}Ra dan hasil luruhannya	dalam bentuk pasir, tanah liat, parafin, logam berat	separator dan tangki skimmer
Endapan Pb	^{210}Pb dan luruhannya	dalam bentuk endapan Pb stabil	bagian basah instalasi produksi gas dan pipa bor
Kondensat	^{210}Po	<i>unsupported</i>	produksi gas
Gas alam	^{222}Rn , ^{210}Pb , dan ^{210}Po	dalam bentuk gas mulia menempel pada permukaan	pemakai utama, treatment gas dan sistem transpor
Air produksi	^{228}Rn , ^{226}Ra , ^{224}Ra dan ^{210}Pb	sebagai <i>saline</i> , dan volume paling besar dalam produksi minyak	setiap fasilitas produksi

2.6.2 Konsentrasi NORM pada industri minyak dan gas bumi

Berdasarkan data survei dan pengukuran konsentrasi NORM pada industri minyak dan gas bumi di berbagai negara pada tahun 1996, konsentrasi NORM yang terkandung di dalam kerak air, lumpur dan pasir berkisar antara 600 – 900 Bq/kg. Secara umum konsentrasi NORM di lumpur lebih rendah dibandingkan di kerak air, hal ini dapat dilihat pada Tabel 2.7 berikut ini.

Tabel 2.7 Konsentrasi NORM pada industri minyak dan gas bumi di beberapa negara (Bunawas, 2005)

No	Negara	Jenis NORM	Konsentrasi (Bq/kg)		
			^{228}Ra	^{228}Th	^{226}Ra
1	Norwegia	<i>Scale</i>	700-36.000	-	4.000-105.000
2	Belanda	<i>Scale</i>	7.000-500.000	10.000-200.000	50.000-900.000
		<i>Sludge</i>	8.000-600.000	3.000-70.000	1.200-800.000
3	Jerman	<i>Scale</i>	50.000-180.000	50.000-170.000	100.000-500.000
4	Inggris	<i>Scale</i>	14.000-	-	25.000-

			290.000		370.000
5	Australia	<i>Scale</i>	~ 300.000	~ 25.000	~ 250.000
		<i>Sludge</i>	~ 29.500	~ 2.600	~ 25.000
		<i>Sand</i>	~ 9.600	~ 2.300	~ 8.900
6	Malaysia	<i>Sludge</i>	200-900	150-300	300-1.500
7	Itali	<i>Scale</i>	-	-	1126-2.890
		<i>Sludge</i>	-	-	169-453

Keterangan : (~) nilai kisaran

Scale (kerak air), *Sludge* (endapan lumpur), *Sand* (pasir)

Beberapa perusahaan minyak dan gas bumi di Indonesia yang memiliki potensi limbah TENORM tinggi diantaranya adalah PT. Caltex Pasifik Indonesia dan PT. Connoco Philips Indonesia. Pada Tabel 2.8 berikut dapat dilihat besar konsentrasi NORM pada kedua industri.

Tabel 2.8 Konsentrasi NORM pada industri minyak dan gas bumi di Indonesia (Bunawas, 2005)

No	Industri	Jenis NORM	Konsentrasi NORM (Bq/g)		
			²²⁸ Ra	²²⁸ Th	²²⁶ Ra
1	PT. Caltex Pasifik	<i>scale</i>	600 - 222720	140 - 90880	350 - 263110
		<i>sludge</i>	2400 - 3600	1100 - 1400	2400 - 2500
		<i>sand</i>	2300 - 170000	1380 - 177800	2400 - 211000
2	PT. Connoco Philips	<i>scale dan sludge</i>	132 - 7291	136 - 5187	280 - 2756

Berdasarkan data konsentrasi pada tabel di atas PT. Caltex Pasifik Indonesia dan PT. Connoco Philips Indonesia memiliki nilai konsentrasi NORM yang sangat tinggi, baik dalam bentuk *scale*, *sludge* ataupun *sand*, yaitu berkisar antara 132 Bq/kg sampai dengan 222.720 Bq/kg. Sedangkan batasan untuk dilakukan tindakan *intervensi* apabila konsentrasi ²²⁶Ra dan ²³²Th lebih dari 1.000 Bq/kg dan ⁴⁰K lebih dari 10.000 Bq/kg.

2.7 Aspek Proteksi Radiasi TENORM

Pengelolaan limbah (TENORM) merupakan salah satu aspek penting dalam keselamatan radiasi yang bertujuan untuk membatasi

pemaparan masyarakat dan pekerja terhadap radiasi pengion dan melindungi lingkungan dari pelepasan radioaktivitas alam atau peningkatan konsentrasi radioaktivitas alam.

Pengukuran aktivitas dan paparan radiasi setiap radionuklida yang terkandung di dalam NORM perlu dilakukan untuk memastikan tingklat aktivitas radionuklida tersebut. *International Atomic Energy Agency* (IAEA) dan juga beberapa Negara telah memberikan rekomendasi mengenai batasan (aktion level) aktivitas radionuklida TENORM. Apabila aktivitas radionuklida sudah memenuhi batasan tersebut maka TENORM harus dikendalikan sebagaimana halnya limbah radioaktif. Berdasarkan rekomendasi dari *Basic Safety Standard* yang dikeluarkan oleh IAEA, batas tindakan penanganan TENORM apabila konsentrasinya mencapai $\geq 1000\text{--}10.000$ Bq/kg atau mempunyai paparan radiasi gamma sebesar ≥ 50 $\mu\text{R}/\text{jam}$ (Syarbaini, 2003).

2.7.1 Paparan radiasi eksternal

Keberadaan NORM dalam industri minyak dan gas bumi yang tidak diketahui dengan pasti karena tidak dilakukannya pemantauan dapat memberikan paparan radaisi eksternal selama proses produksi berlangsung yang berasal dari akumulasi radionuklida yang memancarkan radiasi gamma dan paparan radiasi interna melalui jalur inhalasi dan pencernaan terhadap para pekerja dan lingkungan. Paparan radiasi dapat mengalami peningkatan selama proses *decomisioning* (pembersihan pipa dan tangki) fasilitas produksi minyak dan gas bumi serta dari kegiatan pengelolaan dan pembuangan limbah TENORM. Pengendapan kerak dan lumpur yang mengandung NORM di dalam pipa, *vessel* dan tangki dapat meningkatkan laju dosis yang signifikan di dalam dan di luar komponen alat produksi (Tabel 2.9 dan Tabel 2.10). Hasil peluruhan ^{226}Ra dan ^{228}Ra yang berumur pendek seperti ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{212}Pb , ^{212}Bi dan ^{208}Th yang memancarkan radiasi gamma dapat menembus dinding alat produksi dan memberikan laju dosis yang cukup tinggi bila kerak yang terakumulasi lebih dari beberapa bulan. Laju dosis tergantung pada jumlah dan konsentrasi NORM serta perisai dinding pipa atau alat produksi.

Tabel 2.9 Paparan radiasi gamma eksternal pada fasilitas proses produksi minyak dan gas bumi di luar negeri (Bunawas, 2005)

No	Lokasi	Laju Paparan ($\mu\text{Sv/h}$)
1	<i>Down hole tubing, safety valve (interna)</i>	> 300
2	<i>Wellhead, manifold</i>	0,1 – 22,5
3	Pipa produksi	0,3 – 4
4	Separator (interna)	> 200
5	Separator (eksternal)	> 15
6	Air Buangan	0,2 – 0,5

Tabel 2.10 Paparan radiasi gamma eksternal pada fasilitas proses produksi minyak dan gas bumi di Indonesia (Bunawas, 2005)

No	Lokasi	Laju Paparan ($\mu\text{Sv/h}$)
1	<i>Safety valve (interna)</i>	40
2	Tangki air pelunakan (<i>Water softener</i>)	0,8 – 11
3	Pipa air pelunakan (eksternal)	0,8 – 8
4	Pipa air pelunakan (internal)	20 – 30
5	Tangki kondensat	0,08 – 0,5
6	Pipa Separator	0,08 – 2
7	Pemanas	0,1 – 1,6

Sedangkan paparan radiasi eksternal di industri minyak dan gas bumi di Indonesia berdasarkan hasil pengukuran di PT. Caltex Pasifik Indonesia (CPI) dan PT Connoco Philips Indonesia (COPI) berkisar antara 0,08–40 $\mu\text{Sv/h}$, menurut Asosiasi Perminyakan Amerika Serikat (API) batas tindakan (*Action Level*) untuk paparan radiasi eksternal sebesar 0,5 $\mu\text{Sv/h}$ atau setara dengan 50 $\mu\text{R/h}$.

2.7.2 Paparan radiasi interna

Paparan radiasi interna dari NORM berasal dari pemasukan radionuklida melalui jalur inhalasi dan pencernaan. Ini dapat terjadi pada saat peralatan atau alat produksi yang sudah terkontaminasi

serta banyak mengandung kerak NORM, sehingga mudah sekali terbang dan terhirup oleh para pekerja. Sedangkan paparan radiasi melalui jalur pencernaan dapat terjadi pada saat makan, minum, dan merokok apabila tidak ada larangan di area tempat kerja.

Paparan radiasi interna menjadi dominan apabila sarana keselamatan kerja seperti masker dan sarung tangan tidak digunakan secara benar. Perlu diketahui bahwa bahan seperti kerak timah dan kerak tembaga mengandung radionuklida alam (NORM) ^{226}Ra , ^{228}Ra , ^{228}Th dan ^{238}U yang cukup tinggi (Bunawas, 2005).

2.7.3 Praktek tindakan proteksi radiasi

Untuk meminimalisasi dosis radiasi yang diterima oleh para pekerja yang berhubungan dengan NORM pada industri minyak dan gas bumi sesuai dengan konsep ALARA (*As Low As Reasonable Achievable*), maka ada beberapa praktek tindakan proteksi radiasi yang perlu diterapkan, yaitu untuk tindakan pencegahan paparan radiasi eksternal sedapat mungkin diupayakan untuk tidak terlalu lama berada di dekat sumber radiasi untuk mencegah terjadinya paparan radiasi yang besar (minimalisasi waktu). Untuk masyarakat umum untuk pencegahan terhadap paparan radiasi yang berasal dari instalasi nuklir dilakukan dengan mengatur jarak antara instalasi nuklir dengan lokasi tempat tinggal masyarakat di sekitarnya pada jarak tertentu (optimasi jarak). Selain itu juga dibuat pagar pembatas area untuk mencegah masyarakat agar tidak melakukan aktivitas di dekat instalasi tersebut atau menggunakan *shielding*.

Sedangkan tindakan pencegahan untuk paparan radiasi internal antara lain dengan menggunakan masker, pakaian kerja khusus, tidak makan, minum, merokok di area tempat kerja dan tidak melakukan tindakan lain yang berpotensi menimbulkan bahaya serta mengusahakan agar NORM tetap dalam keadaan lembab agar tidak terbang ke udara.

2.8 Pemantauan Radiasi (*Surveimeter Radiasi*)

Radiasi tidak dapat diidentifikasi secara mudah dengan panca indera manusia karena tidak mempunyai rasa, bau dan warna yang spesifik. Oleh karena itu untuk memantau adanya radiasi pengion disekitarnya diperlukan alat pemantau radiasi. Untuk proses

proteksi radiasi selain pemantauan dosis perorangan, diperlukan juga adanya pemantauan radiasi dan radioaktivitas lingkungan. Pemantauan radiasi dimaksudkan untuk mengetahui secara langsung tingkat radiasi pada suatu daerah kerja, sedangkan pemantauan radioaktivitas lingkungan dimaksudkan untuk mengetahui tingkat kontaminasi radioaktif baik di daerah kerja maupun lingkungan di sekitar kawasan kerja.

Setiap alat pemantau radiasi mempunyai detektor yang mampu mengenali adanya radiasi. Apabila radiasi pengion melintasi bahan detektor, maka akan terjadi interaksi yang dapat menimbulkan beberapa tanggapan sebagai hasil interaksi antara bahan detektor dan radiasi pengion. Untuk mengukur besarnya tanggapan yang terjadi, detektor dihubungkan dengan rangkaian elektronik yang mampu memberikan sinyal masukan pada rangkaian pembaca. Hasil pengukuran radiasi ditampilkan dalam bentuk angka-angka, yang selanjutnya dapat diubah dengan faktor konversi tertentu menjadi angka-angka hasil bacaan yang menunjukkan tingkat radiasi yang diterima oleh detektor.

Apabila dilihat dari jenis radiasi yang akan dideteksi, ada berbagai jenis alat pemantau radiasi yang hanya mampu memantau satu jenis radiasi saja, misalnya alat pemantau radiasi yang khusus memantau laju dosis sinar-X, gamma, beta atau alfa. Namun ada juga beberapa jenis alat pemantau radiasi yang mampu memantau lebih dari satu jenis radiasi.

Alat ukur radiasi atau detector radiasi sering dikenal dengan surveimeter radiasi. Jenis bahan pemantau radiasi atau detektor radiasi yang digunakan pada surveimeter bervariasi bergantung pada tujuan penggunaannya. Pemantau radiasi secara garis besar dapat dikelompokkan ke dalam tiga jenis penggunaan, yaitu Surveimeter radiasi yang dipakai untuk mengukur tingkat radiasi yang memberikan data hasil pengukuran dalam laju dosis (dosis radiasi persatuan waktu, misalnya dalam $\mu\text{Sv/h}$, mRem/h , dll). Surveimeter kontaminasi permukaan yang dipakai untuk mengukur tingkat kontaminasi radioaktif pada suatu permukaan dan biasanya memberikan data dalam bentuk hasil cacahan per satuan waktu dan dapat dikonversikan atau diolah lebih lanjut menjadi tingkat kontaminasi per satuan luas. Alat cacah radiasi yang dipakai untuk

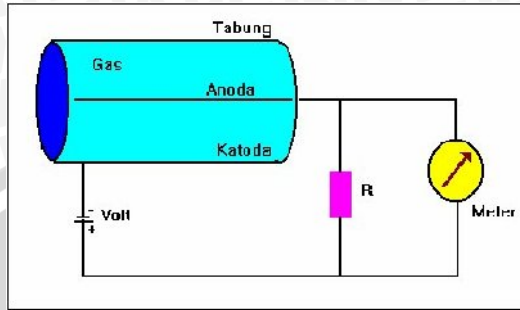
mengukur aktivitas zat radioaktif dan memberikan data hasil pengukuran dalam bentuk aktivitas per satuan berat atau volume bahan, misal dalam Bq/gr, Bq/m³ dan sebagainya. Secara spesifik jenis alat pendeteksi yang biasa digunakan sebagai detektor radiasi adalah (Ferdiana, 2008):

1. detektor ionisasi gas (contoh: detektor kamar ionisasi, detektor proporsional, detektor geiger muller)
2. detektor sintilasi (contoh: detektor sintilasi nai(tl) atau detektor gamma)
3. detektor semikonduktor

Detektor radiasi merupakan instrument pokok yang digunakan dalam kegiatan pemantauan radiasi dan kontaminasi lingkungan. Detektor radiasi yang baik, stabil dan sesuai dengan standart akan memberikan informasi hasil pengukuran radiasi yang dapat dipertanggungjawabkan.

2.8.1 Detektor ionisasi gas

Salah satu jenis alat pemantau radiasi yang pertama kali diperkenalkan dan sampai saat ini masih dipergunakan adalah alat pemantau radiasi dengan detektor ionisasi gas. Detektor ini bekerja dengan memanfaatkan hasil interaksi antara radiasi pengion dengan atom atau molekul gas yang dipakai sebagai detektor. Lintasan radiasi pengion di dalam bahan detektor dapat mengakibatkan terlepasnya elektron-elektron dari atom bahan tersebut sehingga terbentuklah pasangan ion positif dan negatif. Proses pembentukan pasangan ion inilah yang disebut dengan proses ionisasi. Karena bahan detektornya berupa gas maka detektor radiasi ini disebut detektor ionisasi gas. Adapun skema dari detektor ionisasi gas dapat dilihat pada Gambar 2.8 berikut ini,



Gambar 2.8 Skema detektor ionisasi gas
(sumber : Yudhi, 2007)

Detektor ionisasi gas berbentuk silinder yang berisi gas dan mempunyai dua elektroda yang berfungsi sebagai keping-keping kapasitor. Dinding tabung yang dipakai sebagai selubung gas berfungsi sebagai elektroda negatif (katoda), sedangkan kawat yang berada di tengah-tengah tabung berfungsi sebagai elektroda positif (anoda). Apabila kapasitas dari kapasitor adalah C dan beda potensial antara kedua elektrodanya adalah sebesar sumber tegangannya V , maka muatan listrik Q yang disimpan dalam kapasitor adalah:

$$Q = C \times V \quad (2.21)$$

Masuknya radiasi ke dalam tabung detektor menyebabkan terbentuknya pasangan ion. Ion positif akan tertarik ke katoda dan ion negatif tertarik ke anoda. Karena menarik ion-ion yang berlawanan, maka akan terjadi pengurangan muatan listrik pada masing-masing elektroda. Penurunan jumlah muatan itu, mengakibatkan penurunan tegangan antara kedua elektroda, yang dirumuskan seperti pada persamaan berikut :

$$\Delta V = \frac{\Delta Q}{C} \quad (2.22)$$

dan jika N menyatakan jumlah pasangan ion yang terbentuk dan e adalah muatan elektron ($1,6 \times 10^{-19}$ C), maka jumlah penurunan muatan pada kapasitor adalah sebesar :

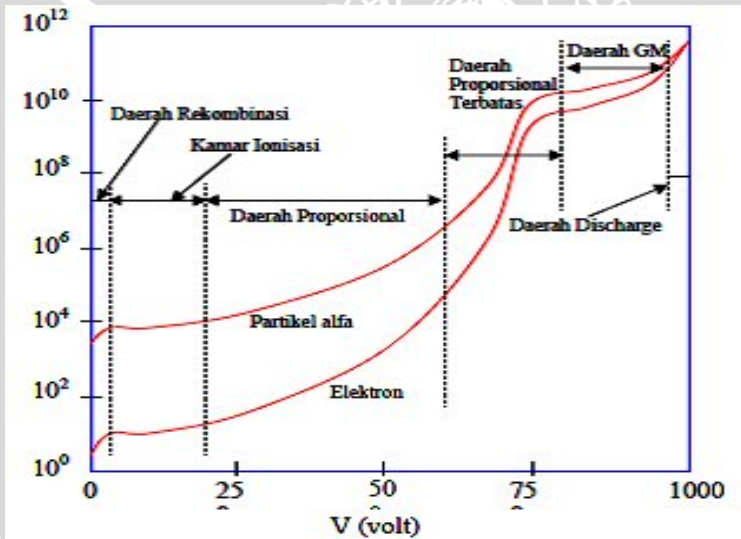
$$\Delta Q = N_e \quad (2.23)$$

dengan mensubstitusikan persamaan (2.20) dan (2.21) diperoleh :

$$\Delta V = \frac{N_e}{C} \quad (2.24)$$

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa penurunan tegangan sebanding dengan pasangan ion yang terbentuk. Sedang jumlah pasangan ion itu sendiri bergantung pada jenis dan energi radiasi yang ditangkap oleh detektor. Perubahan tegangan itu akan mengakibatkan terjadinya aliran listrik yang dapat dikonversi menjadi angka-angka hasil cacahan radiasi (Devanda, 2008).

Dengan memanfaatkan tingkah laku ion-ion gas dalam medan listrik, terdapat tiga jenis detektor ionisasi gas yang bekerja pada daerah yang berbeda-beda seperti pada Gambar 2.9, yaitu detektor kamar ionisasi yang bekerja di daerah ionisasi, detektor proporsional yang bekerja pada daerah proporsional serta detektor geiger-muller (GM) yang bekerja di daerah geiger muller. Ketiganya mempunyai bentuk dasar dan prinsip kerja yang sama. Perbedaanya terletak pada tegangan operasi masing-masing.



Gambar 2.9 Grafik pembagian daerah kerja detektor ionisasi gas (sumber : Yudhi, 2007)

2.8.1.1 Detektor kamar ionisasi (*ionisasi chamber*)

Detektor kamar ionisasi beroperasi pada tegangan paling rendah dan jumlah ion yang dihasilkan di daerah ionisasi relatif

sedikit. Keuntungan detektor ini adalah dapat membedakan energi yang memasukinya dan tegangan kerja yang dibutuhkan tidak terlalu tinggi. Namun, arus yang timbul sangat kecil, sehingga diperlukan penguat arus yang sangat besar dan sensitivitas alat baca yang tinggi

2.8.1.2 Detektor proporsional

Detektor proporsional beroperasi pada tegangan yang lebih tinggi daripada kamar ionisasi. Detektor proporsional mampu mendeteksi radiasi dengan intensitas yang cukup rendah. Namun, memerlukan sumber tegangan yang sangat stabil.

2.8.1.3 Detektor geiger muller

Detektor geiger muller (GM) beroperasi pada tegangan di atas detektor proporsional. Detektor ini merupakan detektor yang paling sering digunakan, karena dari segi elektronik sangat sederhana, tidak perlu menggunakan rangkaian penguat. Sebagian besar peralatan ukur proteksi radiasi yang bersifat portabel, terbuat dari detektor geiger mueller (Setiawan, 2009).

2.8.2 Detektor sintilasi

Detektor sintilasi bekerja dengan memanfaatkan proses terpercarnya sinar tampak ketika terjadi transisi elektron dari tingkat energi yang lebih tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah. Proses sintilasi ini terjadi apabila terdapat kekosongan elektron yang disebabkan karena lepasnya elektron dari ikatannya (proses ionisasi) atau loncatnya elektron ke lintasan yang lebih tinggi bila dikenai radiasi (proses eksitasi). Jadi dalam proses sintilasi ini, energi radiasi diubah menjadi pancaran cahaya tampak. Semakin besar energi radiasi yang diserap maka semakin banyak kekosongan elektron yang terjadi sehingga percikan cahaya yang dihasilkan akan semakin banyak. Detektor sintilasi terdiri dari dua bagian yaitu bahan sintilator dan photomultiplier. Bahan sintilator merupakan suatu bahan padat, cair maupun gas, yang akan menghasilkan percikan cahaya apabila dikenai radiasi pengion. Photomultiplier digunakan untuk mengubah percikan cahaya yang dihasilkan bahan sintilator menjadi pulsa listrik. Jumlah percikan cahaya sebanding dengan

energi radiasi yang diserap dan besarnya juga dipengaruhi oleh jenis bahan sintilatornya. Berikut ini adalah beberapa contoh bahan sintilator yang sering digunakan sebagai detektor radiasi adalah kristal NaI(Tl), kristal ZnS(Ag), kristal LiI(Eu) dan sintilator Organik

2.8.3 Detektor semikonduktor

Detektor semikonduktor memiliki efisiensi dan resolusi yang lebih baik dari pada detektor ionisasi gas dan detektor sintilasi, karena daya dan energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan ion-ion lebih rendah dibandingkan dengan kedua jenis detektor tersebut. Dengan energi yang sama jumlah ion-ion yang dihasilkan lebih banyak, hal inilah yang menyebabkan detektor semikonduktor sangat teliti dan memiliki resolusi yang tinggi dalam membedakan energi radiasi yang diterimanya.

Setiap detektor memiliki karakteristik yang berbeda-beda, serta memiliki kelemahan dan keunggulan masing-masing. Pemilihan detektor harus mempertimbangkan spesifikasi yang sesuai dengan tujuan dan kegunaan. Sebagai contoh, detektor yang digunakan pada alat ukur portabel (mudah dibawa) sebaiknya dipilih detektor ionisasi gas, detektor yang digunakan pada alat ukur untuk radiasi alam (intensitas sangat rendah) sebaiknya digunakan detektor sintilasi, sedangkan detektor pada sistem spektroskopi untuk menganalisis bahan sebaiknya digunakan detektor semikonduktor. Sifat dan karakteristik dari masing-masing detektor dapat dilihat pada Tabel 2.11 di bawah ini :

Tabel 2.11 Karakteristik detektor radiasi (Akhadi, 2000)

Spesifikasi	Jenis Detektor		
	Ionisasi Gas	Sintilasi	Semikonduktor
Efisiensi	+	+++	++
Kecepatan	+	+++	++
Resolusi	+	++	+++
Konstruksi	+++	++	+

Keterangan : (+++) baik, (++) sedang, (+) kurang baik

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian tugas akhir ini mengambil judul “*Paparan Radiasi Gamma dalam Limbah TENORM di Industri Minyak dan Gas Bumi*” yang dilaksanakan di Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi (PTKMR) BATAN Jakarta. Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Juli-Agustus 2009.

3.2 Alat dan Bahan

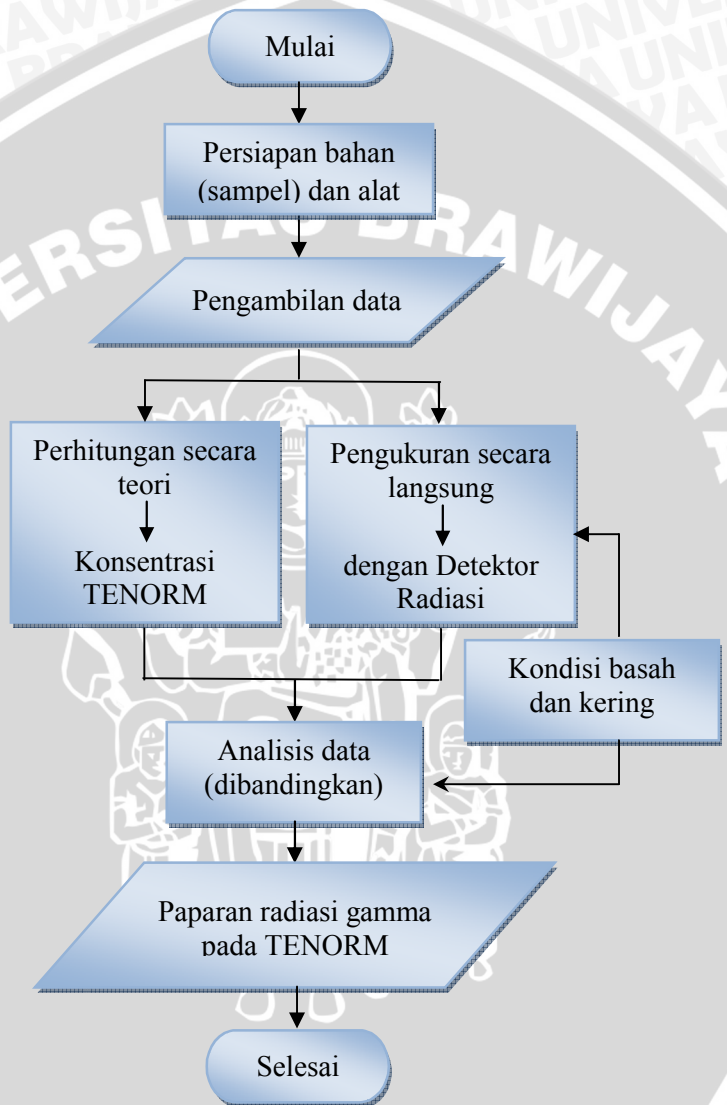
Alat – alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain, timer (digunakan sebagai pencacah waktu), mistar (digunakan sebagai alat ukur jarak), monitor meteorologi (yang terdiri dari sensor suhu dan kelembapan), threeport dengan panjang $\pm 1\text{m}$ (digunakan sebagai penyangga monitor radiasi lingkungan) dan lima macam alat detektor radiasi gamma yaitu Atomtec, Ludlum 19 (jenis detektor NaI(Tl)), Reuter Stokes RS-112 (jenis detektor Kamar Pengion), Inspector dan Mini Instrumen (jenis detektor pencacah Geiger Muller). Sedangkan bahan yang digunakan adalah sampel limbah TENORM industri minyak dan gas bumi yang telah diletakkan di dalam bak (dengan ukuran diameternya $\pm 4,4\text{ m}$ dan tebal $\pm 40\text{ cm}$).

3.3 Rancangan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan mengambil data primer yaitu pengukuran secara langsung paparan radiasi gamma dari limbah TENORM yang ada di PTKMR-BATAN dengan menggunakan lima macam alat surveimeter. Dari data yang didapat, dilakukan analisa lebih lanjut dengan membandingkan data hasil pengukuran secara eskperimen (langsung) dengan data hasil secara teoritis. Pada penelitian ini juga digunakan data sekunder, yaitu data konsentrasi radionuklida yang terkandung dalam limbah TENORM yang diperlukan untuk menghitung nilai paparan radiasi secara teori. Sehingga dapat diketahui nilai paparan radiasi gamma pada limbah TENORM baik secara langsung maupun berdasarkan teori.

3.4 Alur Penelitian

Secara umum alur rancangan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut ini :

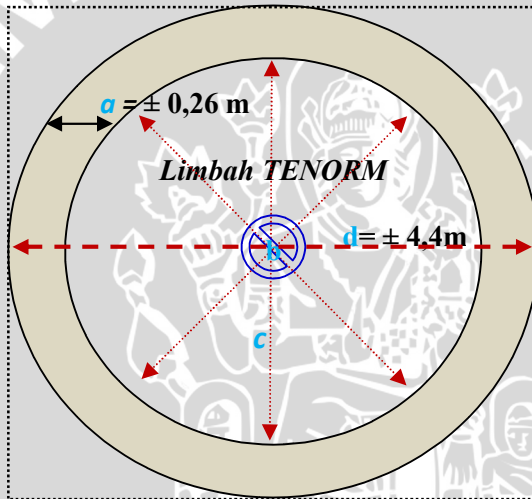


Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.5 Metode Pengambilan Data

3.5.1 Persiapan bahan (sampel)

Pada penelitian ini obyek yang digunakan adalah sampel limbah TENORM industri minyak dan gas bumi, yang diletakkan dalam sebuah bak yang terbuat dari semen dengan diameter $\pm 4,4$ m, tebal $\pm 0,26$ m dan tinggi $\pm 0,4$ m. Limbah TENORM dalam penelitian ini berbentuk padatan seperti pasir (tanah) berwarna coklat. Sebelum dilakukan pengukuran, sampel limbah TENORM dihomogenkan dengan cara diaduk, kemudian dilakukan pemadatan dengan tujuan untuk meratakan permukaannya. Skema penampang limbah TENORM dapat dilihat pada Gambar 3.2 berikut ini :



Gambar 3.2 Penampang limbah TENORM tampak atas dan posisi titik pengamatan

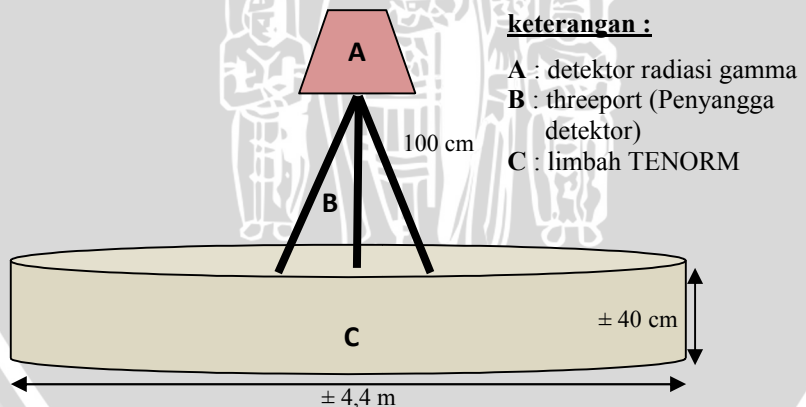
keterangan :

- : bak wadah limbah TENORM (terbuat dari semen dengan tebal $\pm 0,26$ m)
- : titik tengah limbah TENORM (pusat pengamatan)
- : limbah TENORM
- : diameter bak ($\pm 0,4$ m)

3.5.2 Pengukuran secara langsung paparan radiasi gamma pada limbah TENORM

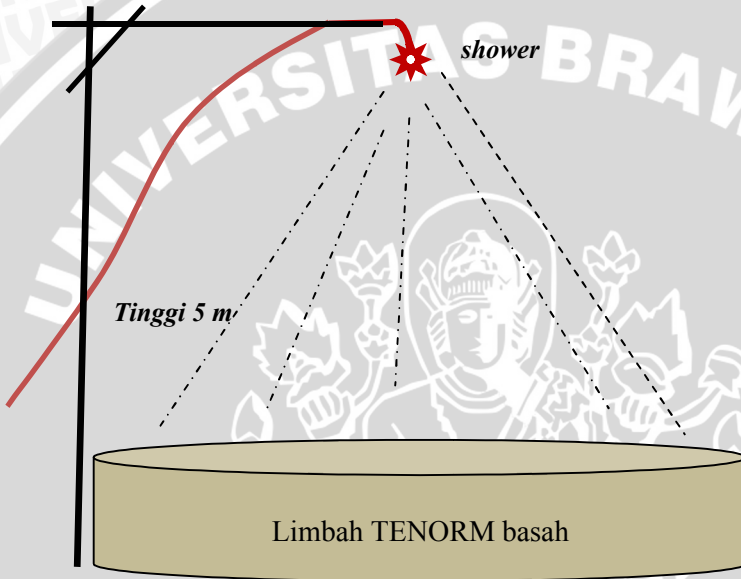
Pada penelitian ini pengukuran paparan radiasi gamma dilakukan dalam dua kondisi, yaitu pada waktu limbah TENORM dalam kondisi kering dan dalam kondisi basah. Pengukuran dilakukan tiap jam, hal ini dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui besar paparan radiasi gamma tiap waktu (yaitu pada pagi hari, siang, sore dan malam) dalam dua kondisi yang berbeda. Pengukuran paparan radiasi gamma pada limbah TENORM secara langsung menggunakan lima macam alat detektor, yaitu Atomtec, Ludlum 19, Inspector, Mini Instrumen dan Reuter Stokes RS-112. Dari kelima detektor yang digunakan Reuter Stokes RS-112 merupakan jenis detektor kamar pengion yang paling teliti dan akurat (berdasarkan pada penelitian sebelumnya), sehingga pada pengukuran paparan radiasi gamma secara langsung (selama ± 24 jam) hanya digunakan satu detektor, yaitu Reuter Stokes RS-112. Karakteristik dan sifat dari kelima alat detektor radiasi dapat dispesifikasikan dalam Tabel 3.4 (lampiran).

Detektor radiasi gamma diletakan pada pusat permukaan, hal ini dilakukan dengan anggapan sumber radiasinya sudah homogen sehingga dapat dianggap sebagai sumber titik, sketsa pengukuran secara langsung dengan detektor radiasi gamma dapat dilihat pada Gambar 3.3 berikut ini :



Gambar 3.3 Penampang limbah TENORM dan detektor radiasi gamma

Pada penelitian ini dilakukan simulasi hujan buatan untuk membasahi sampel (limbah TENORM), yang akan digunakan untuk pengukuran paparan radiasi gamma pada limbah TENORM dalam kondisi basah. Hal ini dilakukan karena tidak dimungkinkannya terjadi turun hujan (hujan sebenarnya). Adapun sketsa simulator hujan buatan dapat dilihat pada Gambar 3.4 berikut ini :



Gambar 3.4 Simulator hujan buatan

Tinggi shower (sumber air) disesuaikan dengan lebar sebaran air yang keluar dari shower, dengan tekanan yang tetap air akan dapat menyebar ke segala arah, sehingga dapat membasahi limbah TENORM secara merata. Lama penyiraman ± 15 menit (sampai air benar-benar menyerap), kemudian baru dilakukan pengukuran.

3.5.3 Perhitungan paparan radiasi gamma pada limbah TENORM berdasarkan teori

Nilai paparan radiasi gamma pada limbah TENORM dapat diketahui dengan cara melakukan perhitungan secara teori dengan memanfaatkan informasi besarnya nilai konsentrasi dari setiap

radionuklida yang terkandung dalam limbah TENORM dan nilai laju dosis gamma per radionuklida. Perhitungan laju dosis gamma menurut teori dapat ditulis seperti pada persamaan berikut ini :

$$\dot{D}_1 = C_{Ra} \times \Gamma_{Ra} \quad (3.1)$$

$$\dot{D}_2 = C_{Th} \times \Gamma_{Th} \quad (3.2)$$

$$\dot{D}_3 = C_K \times \Gamma_K \quad (3.3)$$

Sehingga dari persamaan di atas diperoleh laju dosis gamma total, sebagai berikut :

$$\dot{D}_T = \dot{D}_1 + \dot{D}_2 + \dot{D}_3 + \dots \quad (3.4)$$

di mana,

- \dot{D} = laju dosis gamma tiap radionuklida ($\mu\text{R/h}$)
- C = konsentrasi tiap radionuklida (Bq/kg)
- Γ = laju dosis gamma teori per 1 Bq/kg tiap radionuklida
- \dot{D}_T = laju dosis gamma total ($\mu\text{R/h}$)

Nilai konsentrasi radionuklida (C) yang digunakan dalam perhitungan adalah nilai konsentrasi radionuklida yang terkandung dalam limbah TENORM. Sedangkan untuk nilai laju dosis gamma teori per 1 Bq/kg digunakan data dari IAEA (*International Atomic Energy Agency*) dan JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*).

3.6 Analisis Data dan Hasil

Hasil data yang diperoleh, dari pengukuran langsung dengan menggunakan detektor radisi akan dibandingkan dengan pengukuran tidak langsung yaitu dengan perhitungan secara teori. Selain itu data hasil pengukuran pada kondisi kering juga akan dibandingkan dengan data hasil pengukuran pada kondisi basah. Sehingga dari semua data yang diperoleh dapat diketahui nilai paparan radiasi gamma pada limbah TENORM.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada penelitian ini pengukuran paparan radiasi gamma dilakukan dalam dua tahapan yaitu pengukuran laju dosis secara teori dan pengukuran laju dosis secara langsung dengan menggunakan detektor radiasi. Data hasil pengukuran secara langsung akan dibandingkan dengan data hasil perhitungan secara teori, hal ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan nilai paparan radiasi gamma pada limbah TENORM dan dapat digunakan sebagai faktor koreksi dari setiap pengukuran.

4.1 Data Hasil Penelitian dan Analisis

4.1.1 Data pengukuran pada limbah TENORM (kondisi kering)

Pada penelitian ini pengukuran paparan radiasi gamma pada limbah TENORM dilakukan secara langsung dengan menggunakan detektor radiasi gamma (Reuter Stokes RSS-112), yaitu jenis detektor kamar ionisasi bertekanan tinggi yang menampilkan laju dosis gamma digital dengan rentang ukur antara 1 – 500 $\mu\text{R/h}$ dengan ketelitiannya sebesar $\pm 5\%$ pada 10 $\mu\text{R/h}$. Pengukuran paparan radiasi gamma dilakukan dalam dua kondisi, yaitu pada limbah TENORM kondisi kering dan dalam kondisi basah. Berikut data pengukuran pada limbah TENORM kondisi kering, dapat dilihat pada Tabel 4.1 :

Tabel 4.1 Laju dosis gamma pada limbah TENORM (kondisi kering)

No	Waktu	T° (C)	RH (%)	Laju dosis bacaan alat
1	11.00	43	42	149,06 \pm 0,18 $\mu\text{R/h}$
2	12.00	44	40	147,33 \pm 0,15 $\mu\text{R/h}$
3	13.00	45	31	145,30 \pm 0,14 $\mu\text{R/h}$
4	14.00	43	37	144,36 \pm 0,13 $\mu\text{R/h}$
5	15.00	42	39	143,67 \pm 0,10 $\mu\text{R/h}$
6	16.00	39	42	142,93 \pm 0,05 $\mu\text{R/h}$
7	(17.00 s/d 20.00) ISTIRAHAT			

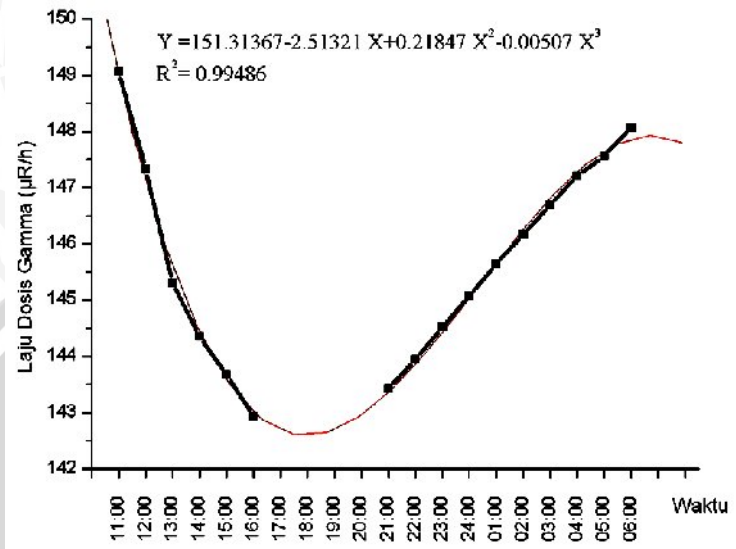
Lanjutan Tabel 4.1

No	Waktu	T° (C)	RH (%)	Laju dosis bacaan alat
8	21.00	26	78	143,43 ± 0,04 µR/h
9	22.00	26	79	143,95 ± 0,05 µR/h
10	23.00	26	80	144,52 ± 0,05 µR/h
11	00.00	24	81	145,07 ± 0,06 µR/h
12	01.00	24	81	145,65 ± 0,05 µR/h
13	02.00	24	81	146,17 ± 0,06 µR/h
14	03.00	23	84	146,7 ± 0,04 µR/h
15	04.00	23	84	147,21 ± 0,05 µR/h
16	05.00	24	83	147,56 ± 0,06 µR/h
17	06.00	25	82	148,07 ± 0,03 µR/h

Pengukuran paparan radiasi gamma pada limbah TENORM dilakukan terhadap fungsi waktu, yaitu pengamatan dilakukan setiap jam. Berdasarkan data hasil pengukuran pada Tabel 4.1 di atas, untuk nilai laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi kering memiliki kisaran nilai antara $142,93 \pm 0,05 \mu\text{R/h}$ sampai dengan $149,06 \pm 0,18 \mu\text{R/h}$. Secara garis besar nilai laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi kering mengalami penurunan pada saat pukul 12.00 sampai dengan pukul 15.00 yang mana suhu mengalami kenaikan dan nilai laju dosis gamma mulai naik lagi sekitar pukul 21.00 sampai dengan pukul 06.00 dimana suhu mulai turun.

Dari perubahan nilai laju dosis gamma tersebut dapat dilihat bahwa tinggi rendahnya suhu sangat berpengaruh terhadap nilai laju dosis gamma pada limbah TENORM. Selain suhu, faktor kelembapan dan tekanan angin juga sangat berpengaruh pada besar laju dosis gamma pada limbah TENOM. Limbah TENORM pada penelitian ini berbentuk padatan seperti pasir (tanah), sehingga pada kondisi kering mudah terbang terbawa angin dan pada suhu yang tinggi gas radon dan thoron banyak yang terlepas di udara bebas.

Berdasarkan data hasil pengukuran pada tabel di atas, hubungan antara laju dosis gamma terhadap waktu untuk limbah TENORM kondisi kering dapat digambarkan seperti pada Gambar 4.1 berikut ini,



Gambar 4.1 Grafik hubungan antara laju dosis gamma terhadap waktu pada limbah TENORM kondisi kering

Berdasarkan grafik di atas dapat diketahui nilai laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi kering memiliki nilai minimum pada saat pukul 16.00 sebesar $142,93 \pm 0,05 \mu\text{R/h}$, dimana kondisi pada waktu itu suhu masih cukup tinggi yaitu mencapai 42°C . Nilai laju dosis gamma pada pukul 17.00 sampai pukul 20.00 terpotong karena waktu digunakan untuk istirahat.

4.1.2 Data pengukuran pada limbah TENORM (kondisi basah)

Pengukuran paparan radiasi gamma pada limbah TENORM kondisi basah, dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui pengaruh limbah TENORM kondisi basah terhadap nilai paparan radiasi gamma yang akan terdeteksi oleh detektor. Untuk membuat limbah TENORM menjadi basah, maka dilakukan simulasi hujan buatan, dimana pada saat dilakukan penelitian tidak dimungkinkan terjadinya turun hujan. Hujan terdapat dalam beberapa macam yaitu hujan halus, hujan rintik-rintik dan hujan lebat. Agar air dapat meresap ke dalam tanah dengan maksimal dan tidak terjadi genangan air di permukaan maka dimanfaatkan hujan rintik-rintik. Berikut data hasil

pengukuran laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi basah, dapat dilihat pada Tabel 4.2 :

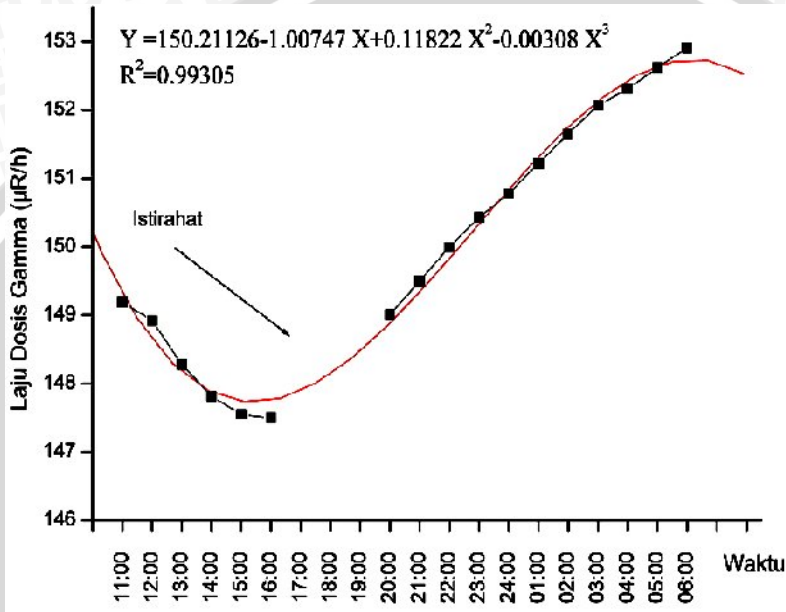
Tabel 4.2 Laju dosis gamma pada limbah TENORM (kondisi basah)

No	Waktu	T° (C)	RH (%)	Laju dosis bacaan alat
1	11.00	38	70	149,19 ± 0,04 µR/h
2	12.00	39	69	148,92 ± 0,11 µR/h
3	13.00	41	52	148,28 ± 0,08 µR/h
4	14.00	42	52	147,82 ± 0,03 µR/h
5	15.00	41	49	147,55 ± 0,02 µR/h
6	16.00	39	50	147,5 ± 0,01 µR/h
7	(17.00 s/d 19.00) ISTIRAHAT			
8	21.00	27	70	149,50 ± 0,04 µR/h
9	22.00	26	74	150,00 ± 0,04 µR/h
10	23.00	26	79	150,43 ± 0,04µR/h
11	00.00	26	80	150,78 ± 0,03 µR/h
12	01.00	26	82	151,22 ± 0,03 µR/h
13	02.00	25	83	151,65 ± 0,07 µR/h
14	03.00	24	84	152,07 ± 0,02 µR/h
15	04.00	24	84	152,31 ± 0,03 µR/h
16	05.00	23	85	152,62 ± 0,03 µR/h
17	06.00	26	82	152,91 ± 0,02 µR/h

Berdasarkan data hasil pengukuran di atas, laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi basah memiliki kisaran nilai antara $147,5 \pm 0,01 \mu\text{R/h}$ sampai dengan $152,91 \pm 0,02 \mu\text{R/h}$, nilai ini lebih besar 3 – 4 % apabila dibandingkan dengan besarnya nilai laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi kering.

Secara umum mulai pukul 11.00 sampai pukul 16.00 nilai laju dosis gamma mulai mengalami penurunan secara bertahap dari nilai laju dosis gamma sebesar $149,19 \pm 0,04 \mu\text{R/h}$ turun sampai $147,5 \pm 0,01 \mu\text{R/h}$, sedangkan pada pukul 21.00 sampai dengan pukul 06.00 nilai laju dosis gamma mulai mengalami kenaikan.

Berdasarkan data hasil pengukuran pada Tabel 4.2 di atas, hubungan antara laju dosis gamma terhadap waktu untuk limbah TENORM kondisi basah dapat digambarkan seperti pada Gambar 4.2 berikut ini,

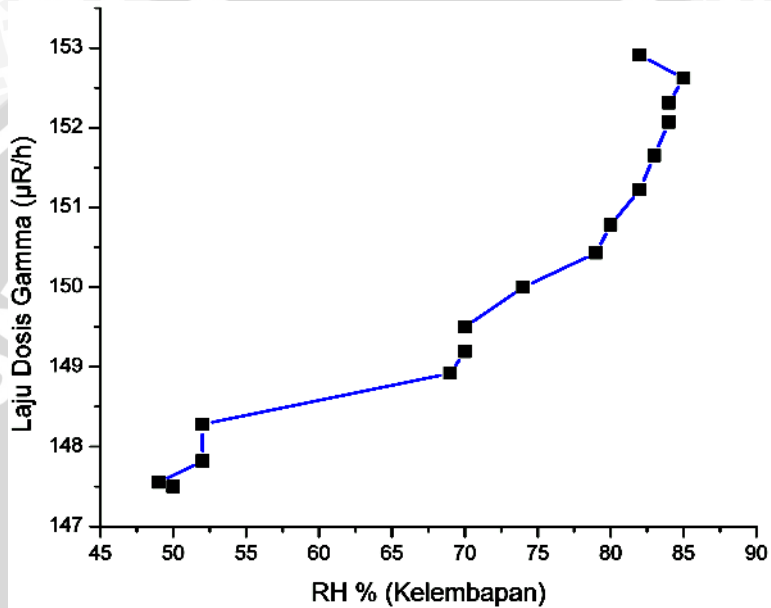


Gambar 4.2 Grafik hubungan antara laju dosis gamma terhadap waktu pada limbah TENORM kondisi basah

Berdasarkan grafik di atas dapat diketahui nilai laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi basah jika diperhatikan bentuk grafiknya mengalami kenaikan secara signifikan. Hal ini dikarenakan pengaruh permukaan limbah TENORM yang basah oleh air hujan (dalam penelitian ini digunakan hujan buatan) dimana faktor kelembapan dan suhu sangat berpengaruh terhadap besar kecilnya nilai laju dosis gamma pada limbah TENORM. Perubahan nilai laju dosis gamma berbanding terbalik dengan tinggi rendahnya suhu, dan berbanding lurus dengan besar kecilnya kelembapan.

Perubahan nilai laju dosis gamma berbanding lurus dengan besar kecilnya kelembapan. Semakin tinggi nilai kelembapan pada limbah TENORM maka nilai laju dosis gamma yang terukur semakin tinggi, dan sebaliknya, semakin rendah nilai kelembapan

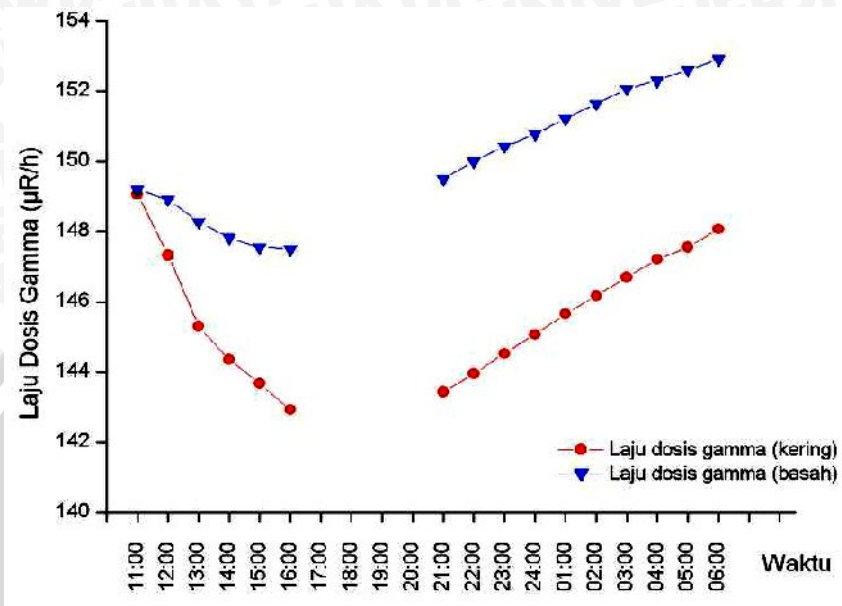
pada limbah TENORM maka nilai laju dosis gamma yang terukur juga semakin rendah (menurun). Hubungan antara laju dosis gamma terhadap kelembapan pada limbah TENORM dapat dilihat pada Gambar 4.3 berikut ini,



Gambar 4.3 Grafik hubungan antara laju dosis gamma terhadap kelembapan pada limbah TENORM

Berdasarkan grafik di atas nilai laju dosis gamma terendah yaitu sebesar 147,5 µR/h pada kelembapan 50%, sedangkan nilai laju dosis gamma tertinggi yaitu sebesar 152,9 µR/h pada kelembapan 82%. Perubahan nilai laju dosis gamma pada limbah TENORM dapat dilihat pada bentuk grafik di atas, yaitu nilai laju dosis gamma semakin naik sebanding dengan semakin tingginya nilai kelembapan.

Nilai laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi basah lebih tinggi dibanding dengan nilai laju dosis gamma limbah TENORM kondisi kering, berikut ini grafik perbandingan antara hasil pengukuran laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi kering dan kondisi basah, dapat dilihat pada Gambar 4.4 berikut ini,

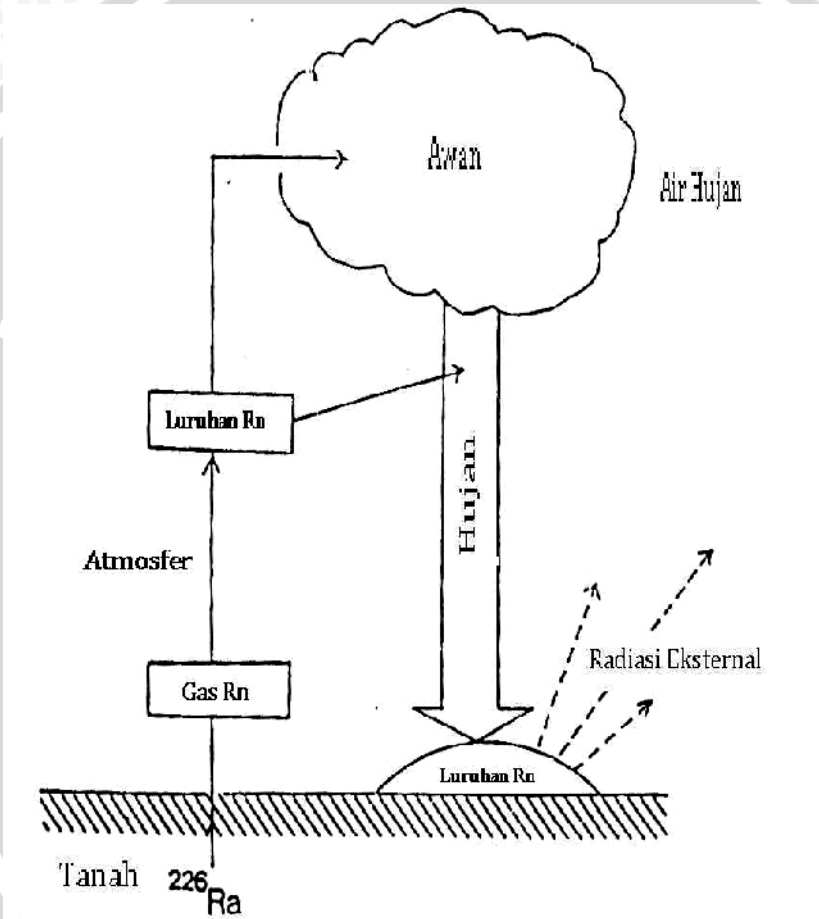


Gambar 4.4 Grafik perbandingan antara laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi kering dan kondisi basah

Berdasarkan grafik perbandingan (Gambar 4.4) dapat diketahui perbandingan nilai antara laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi kering (grafik warna merah) dan laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi basah (grafik warna biru). Laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi basah nilainya lebih tinggi sekitar 3 - 4 % dari nilai laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi kering. Hal ini dikarenakan permukaan limbah TENORM yang basah oleh air. Proses penyiraman air dengan menggunakan hujan buatan membuat molekul-molekul air terserap secara sempurna dan merata, sehingga menjadikan radon dan thoron ikut terserap dan terkukung didalam limbah.

Dalam kondisi seperti ini radionuklida yang ada di dalam limbah TENORM akan terkumpul dan memancarkan radiasi eskternal, seperti pada Gambar 4.5. Oleh karena itu nilai laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi basah nilainya lebih tinggi.

Apabila pada penelitian ini proses pembasahan limbah TENORM memanfaatkan turunya hujan yang sesungguhnya, maka nilai laju dosis gamma yang akan diperoleh pada limbah TENORM kondisi basah dapat meningkat sampai 20 %, dimana unsur-unsur yang terkandung di dalam air hujan dapat meningkatkan nilai laju dosis gamma.



Gambar 4.5 Radionuklida di dalam tanah ketika terjadi hujan

4.2 Data Laju Dosis Gamma secara Teori

Data hasil pengukuran secara langsung akan dibandingkan dengan data hasil perhitungan secara teori, hal ini dilakukan untuk mengetahui perbandingan nilai paparan radiasi gamma pada limbah TENORM dan dapat digunakan sebagai faktor koreksi dari setiap pengukuran. Untuk menghitung nilai paparan radiasi gamma secara teori dibutuhkan data konsentrasi radionuklida yang terkandung dalam TENORM, pada Tabel 4.3 berikut ini dilampirkan data konsentrasi radionuklida yang terkandung dalam TENORM yang didapat dari penelitian sebelumnya,

Tabel 4.3 Konsentrasi radionuklida pada limbah TENORM (Putri,2010)

Radionuklida dalam TENORM	Konsentrasi radionuklida (Bq/kg)
^{226}Ra	1900 ± 100
^{228}Th	2700 ± 100
^{40}K	330 ± 30

Dari data konsentrasi radionuklida yang terkandung pada limbah TENORM di atas perlu diketahui bahwa ^{228}Th adalah anak luruh dari ^{232}Th . Sedangkan ^{226}Ra adalah anak luruh dari ^{238}U . Nilai konsentrasi radionuklida yang tertinggi diperoleh ^{228}Th yaitu sebesar 2700 ± 100 Bq/kg karena radionuklida alam jenis ini (^{228}Th) banyak ditemukan dalam batuan dan mineral pada kulit bumi. Sedangkan untuk nilai konsentrasi radionuklida terendah diperoleh ^{40}K yaitu sebesar 330 ± 30 Bq/kg.

4.2.1 Laju dosis gamma berdasarkan JAERI (*Japan Atomic Energy Research Institute*)

Dasar data acuan nilai paparan radiasi gamma secara teori digunakan dua sumber yaitu berdasarkan *JAERI* dan *IAEA*. Pada Tabel 4.4 berikut ini adalah laju dosis rata-rata paparan radiasi gamma pada jarak 1 m di atas permukaan per 1 Bq/kg berdasarkan *JAERI* untuk masing-masing radionuklida (yaitu ^{40}K , ^{232}Th dan ^{238}U),

Tabel 4.4 Laju dosis gamma berdasarkan JAERI pada jarak 1 m per 1 Bq/kg (Saito, 1998)

Radionuklida	Laju dosis gamma rata-rata	
	^{238}U	$4,63 \times 10^{-1}$ nGy/h
^{232}Th	$6,04 \times 10^{-1}$ nGy/h	$6,94 \times 10^{-2}$ $\mu\text{R/h}$
^{40}K	$4,17 \times 10^{-2}$ nGy/h	$4,79 \times 10^{-3}$ $\mu\text{R/h}$

Laju dosis gamma sebesar 1 pGy/s nilainya sebanding dengan 0,414 $\mu\text{R/h}$. Sehingga untuk radionuklida ^{238}U laju dosis gammanya sebesar $5,32 \times 10^{-2}$ $\mu\text{R/h}$, sedangkan untuk ^{232}Th sebesar $6,94 \times 10^{-2}$ $\mu\text{R/h}$ dan untuk ^{40}K sebesar $4,79 \times 10^{-3}$ $\mu\text{R/h}$. Dari nilai data laju dosis gamma tersebut, laju dosis gamma pada limbah TENORM secara teori dapat dihitung, yaitu dapat dilihat pada Tabel 4.5 di bawah ini,

Tabel 4.5 Laju dosis gamma limbah TENORM berdasarkan JAERI

Radionuklida	Konsentrasi radionuklida (Bq/kg)	Laju dosis gamma ($\mu\text{R/h}$)
Ra 226	1900 ± 100	100 ± 4
Th 228	2700 ± 100	180 ± 5
K 40	330 ± 30	$6 \pm 0,1$

Dari data Tabel 4.5 nilai laju dosis gamma untuk ^{228}Th adalah yang paling besar yaitu sebesar 180 ± 5 $\mu\text{R/h}$ hal ini dikarenakan semakin besar nilai konsentrasi maka nilai laju dosis gammanya juga semakin besar. Sedangkan nilai laju dosis gamma untuk ^{40}K paling kecil karena konsentrasi dari ^{40}K paling kecil yaitu hanya mencapai $6 \pm 0,1$ $\mu\text{R/h}$, dan untuk Ra 226 nilai laju dosis gammanya sebesar 100 ± 4 $\mu\text{R/h}$.

4.2.2 Laju dosis gamma berdasarkan IAEA (*International Atomic Energy Agency*)

Hubungan antara kesebandingan konsentrasi radionuklida *in situ* dengan nilai radiasi exposure untuk radionuklida ^{40}K , ^{232}Th dan ^{238}U pada jarak 1 m di atas permukaan berdasarkan IAEA dapat dilihat dalam Tabel 4.6 berikut ini :

Tabel 4.6 Laju dosis gamma pada jarak 1m berdasarkan IAEA (IAEA, 1989)

Konsentrasi radionuklida	Laju dosis gamma rata-rata ($\mu\text{R/h}$)
1% eK = 313 ± 2 Bq/kg	1,50 $\mu\text{R/h}$
1 ppm eU = $12,35 \pm 0,01$ Bq/kg	0,65 $\mu\text{R/h}$
1 ppm eTh = $4,06 \pm 0,02$ Bq/kg	0,29 $\mu\text{R/h}$

Berdasarkan hubungan kesebandingan di atas didapatkan nilai laju dosis gamma per 1 Bq/kg tiap radionuklida (^{40}K , ^{232}Th dan ^{238}U) seperti pada Tabel 4.7 berikut ini :

Tabel 4.7 Laju dosis gamma berdasarkan IAEA pada jarak 1m per 1 Bq/kg

Konsentrasi radionuklida	Laju dosis gamma rata-rata ($\mu\text{R/h}$)
^{238}U (1 Bq/kg)	$5,25 \times 10^{-2}$ $\mu\text{R/h}$
^{238}Th (1 Bq/kg)	$7,14 \times 10^{-2}$ $\mu\text{R/h}$
^{40}K (1 Bq/kg)	$4,79 \times 10^{-3}$ $\mu\text{R/h}$

Dari nilai laju dosis gamma (IAEA) pada Tabel 4.7 nilai laju dosis gamma pada limbah TENORM dapat diperoleh dengan mengalikan nilai konsentrasi dengan laju dosis gamma per 1 Bq/kg berdasarkan IAEA, nilai hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 4.8 berikut ini,

Tabel 4.8 Laju dosis gamma limbah TENORM berdasarkan IAEA

Radinuklida	Konsentrasi radionuklida (Bq/kg)	Laju dosis gamma ($\mu\text{R/h}$)
^{238}U ; $\text{Ra } ^{226}$	1900 ± 100	99 ± 4
$\text{Th } ^{228}$	2700 ± 100	190 ± 5
$\text{K } ^{40}$	330 ± 30	$6 \pm 0,1$

Nilai laju dosis gamma yang diperoleh berdasarkan IAEA tidak jauh berbeda dengan data hasil perhitungan berdasarkan JAERI. Nilai laju dosis gamma paling besar adalah untuk ^{232}Th yaitu sebesar $190 \pm 5 \mu\text{R/h}$ dan nilai untuk laju dosis ^{40}K adalah sama yaitu sebesar $6 \pm 0,1 \mu\text{R/h}$, sedangkan nilai laju dosis gamma untuk $\text{Ra } ^{226}$ adalah sebesar $99 \pm 4 \mu\text{R/h}$. Pada Tabel 4.9 berikut ini perbandingan nilai laju dosis total berdasarkan JAERI dan IAEA:

Tabel 4.9 Perbandingan laju dosis gamma total berdasarkan JAERI dan IAEA

Radionuklida	JAERI	IAEA
^{238}U	$100 \pm 4 \mu\text{R/h}$	$99 \pm 4 \mu\text{R/h}$
^{232}Th	$180 \pm 5 \mu\text{R/h}$	$190 \pm 5 \mu\text{R/h}$
^{40}K	$6 \pm 0,1 \mu\text{R/h}$	$6 \pm 0,1 \mu\text{R/h}$
\dot{D}_T (Dosis Total)	$286 \pm 9 \mu\text{R/h}$	$295 \pm 11 \mu\text{R/h}$

Berdasarkan data pada Tabel 4.9 nilai laju dosis gamma total berdasarkan JAERI sebesar $286 \pm 9 \mu\text{R/h}$ sedangkan nilai laju dosis gamma total berdasarkan IAEA diperoleh sebesar $295 \pm 11 \mu\text{R/h}$. Hal ini berarti nilai laju dosis gamma berdasarkan hasil perhitungan secara teori memiliki nilai 27–31% lebih besar dibandingkan dengan nilai laju dosis gamma berdasarkan pengukuran secara langsung yaitu berkisar antara $142,93 \pm 0,05 \mu\text{R/h}$ sampai $152,91 \pm 0,02 \mu\text{R/h}$. Hal ini dikarenakan perhitungan secara teori nilai laju dosis gamma dihitung secara spesifik dari jumlah total laju dosis gamma dari

seluruh radionuklida yang terkandung dalam TENORM, tanpa mempertimbangkan sebagian gas radon dan thoron yang terlepas ke udara bebas serta reaksi absorpsi radiasi gamma oleh material TENORM.

4.3 Data Variasi Nilai Laju Dosis pada Alat Surveimeter

Pada penelitian ini digunakan juga lima macam alat surveimeter, yaitu Reuter Stokes RS-112, Atomtec, Ludlum Model 19, Inspector dan Mini Instrumen. Hasil pengukuran dari kelima alat surveimeter akan dibandingkan baik pada limbah TENORM kondisi kering maupun limbah TENORM kondisi basah. Pengukuran dilakukan sebanyak dua kali perulangan, hal ini dilakukan untuk mendapatkan nilai rata-rata laju dosis gamma. Pada Tabel 4.9 dan Tabel 4.10 berikut ini dapat dilihat nilai laju dosis gamma rata-rata berdasarkan bacaan pada masing-masing alat surveimeter :

Tabel 4.10 Nilai laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi kering dengan alat surveimeter lingkungan

No	Nama alat surveimeter	Laju dosis bacaan alat	Laju dosis rata – rata
1	Reuter Stokes RS-112	151.7 $\mu\text{R/h}$	150 \pm 0,5 $\mu\text{R/h}$
		150.7 $\mu\text{R/h}$	
2	Atomtec	153.3 $\mu\text{R/h}$	153 \pm 0,2 $\mu\text{R/h}$
		153 $\mu\text{R/h}$	
3	Ludlum Model 19	165 $\mu\text{R/h}$	164 \pm 1 $\mu\text{R/h}$
		163 $\mu\text{R/h}$	
4	Inspector	184 $\mu\text{R/h}$	180 \pm 2 $\mu\text{R/h}$
		179 $\mu\text{R/h}$	
5	Mini Instrumen	112.5 $\mu\text{R/h}$	104 \pm 8 $\mu\text{R/h}$
		96.5 $\mu\text{R/h}$	

Berdasarkan data yang diperoleh, nilai laju dosis gamma pada masing-masing alat surveimeter nilai yang didapat bervariasi yaitu berkisar antara 184 $\mu\text{R/h}$ sampai 96.5 $\mu\text{R/h}$. Pada tabel diatas dapat dilihat bahwa nilai bacaan laju dosis gamma untuk Inspector

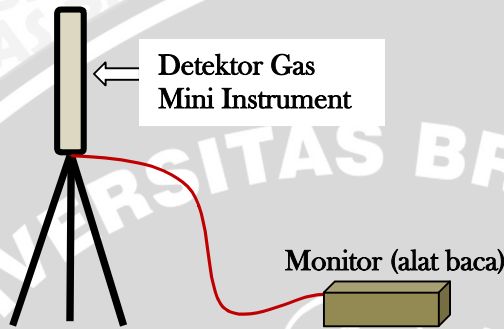
adalah yang paling besar yaitu $180 \pm 2 \mu\text{R/h}$, sedangkan untuk Mini Instrumen diperoleh nilai laju dosis gamma paling kecil yaitu sebesar $104 \pm 8 \mu\text{R/h}$. Hal ini juga dapat dilihat pada Tabel 4.10 yaitu hasil data pengukuran laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi basah berikut ini,

Tabel 4.11 Nilai laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi basah dengan alat survei meter lingkungan

No	Nama alat survei meter	Laju dosis bacaan Alat	Laju dosis rata – rata
1	Reuter Stokes RS-112	153.3 $\mu\text{R/h}$	153 $\pm 0,1 \mu\text{R/h}$
		153.2 $\mu\text{R/h}$	
2	Atomtec	155.4 $\mu\text{R/h}$	158 $\pm 3 \mu\text{R/h}$
		161.8 $\mu\text{R/h}$	
3	Ludlum Model 19	184 $\mu\text{R/h}$	180 $\pm 7 \mu\text{R/h}$
		170 $\mu\text{R/h}$	
4	Inspector	198 $\mu\text{R/h}$	200 $\pm 1 \mu\text{R/h}$
		200 $\mu\text{R/h}$	
5	Mini Instrument	160.8 $\mu\text{R/h}$	145 $\pm 16 \mu\text{R/h}$
		128.6 $\mu\text{R/h}$	

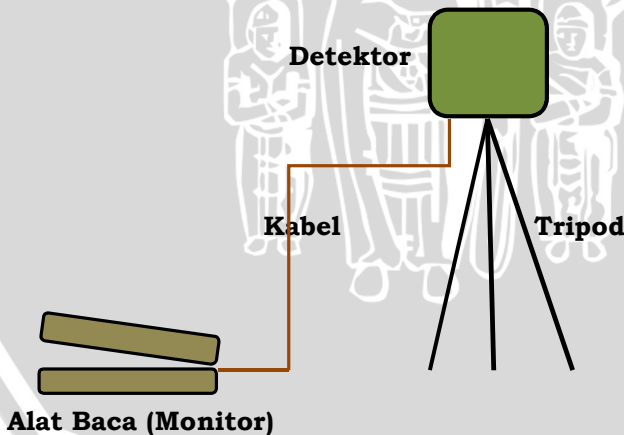
Secara umum berdasarkan Tabel 4.10 dan Tabel 4.11 nilai laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi basah lebih tinggi dari pada nilai laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi kering. Dari data hasil pengukuran pada Tabel 4.11 nilai laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi basah nilai paling besar adalah pada alat survei meter Inspector yaitu mencapai $200 \pm 1 \mu\text{R/h}$. Sedangkan nilai paling kecil yaitu untuk Mini Instrument, nilai laju dosis yang tercatat sekitar $145 \pm 16 \mu\text{R/h}$. Hal ini dikarenakan alat survei meter tipe inspector merupakan monitor radiasi alpha, beta dan gamma, sehingga tidak hanya paparan radiasi gamma yang terdeteksi, namun radiasi dari alpha, beta dan sinar-x juga dapat terdeteksi oleh inspector. Oleh karena itu nilai laju dosis yang tercatat pada alat survei meter Inspector memiliki nilai paling besar. Sedangkan untuk alat survei meter Mini Instrument, karena detektornya berbentuk silinder yang memanjang ke atas akibatnya kurang peka terhadap

radiasi yang ada di bawahnya, sehingga laju dosis yang terdeteksi oleh detector nilainya sangat kecil, seperti pada gambar 4.6 berikut ini,



Gambar 4.6 Detektor Gas Mini Instrument

Dari kelima macam alat surveimeter di atas Reuter Stokes RSS-112 merupakan salah satu alat surveimeter yang sering digunakan untuk menentukan besarnya laju dosis gamma lingkungan. Rangkaian alat pengukuran paparan radiasi gamma dengan detektor kamar ionisasi bertekanan tinggi buatan Reuter Stokes RSS-112 dapat dilihat pada Gambar 4.7 berikut ini :



Gambar 4.7 Rangkaian alat surveimeter Reuter Stokes RSS-112

Ketepatan dan akurasi pengukuran dari total laju paparan radiasi dipengaruhi oleh sumber-sumber radiasi seperti radiasi sinar kosmik sekunder pada bawah atmosfer, radiasi latar gamma alamiah dari radionuklida primordial (dan anak luruhnya) yang ada di dalam tanah dan udara serta dipengaruhi juga isotop pemancar gamma antropogeni dalam kaitannya dengan radiasi langsung fasilitas nuklir. Oleh sebab itu besar nilai laju paparan radiasi gamma pada limbah TENORM baik dalam kondisi kering ataupun basah sebanding dengan besar kecilnya stabilitas suhu dan kelembapan serta ketiga faktor di atas.

4.4 Analisis Keselamatan

Beberapa perusahaan minyak dan gas bumi di Indonesia memiliki potensi penghasil limbah TENORM dari hasil samping produksinya. Limbah tersebut mengandung bahan radioaktif alam (NORM) yang dapat memberikan dampak paparan radiasi eksternal maupun internal bagi para pekerja, masyarakat dan lingkungan. Oleh karena itu industri penghasil TENORM harus melakukan analisis keselamatan khususnya dalam pengelolaan limbah radioaktif. Analisis keselamatan pengelolaan limbah TENORM dilakukan tidak hanya mempertimbangkan seluruh dampak radiologi akan tetapi juga mempertimbangkan dampak non radiologi. Walaupun jumlah dan jenis TENORM yang dihasilkan pada industri minyak dan gas bumi tidak sama, namun pertimbangan yang perlu diberikan adalah bagaimana supaya strategi pengelolaan dapat membatasi resiko radiasi yang diterima. Beberapa aspek yang perlu diperhatikan dalam analisis keselamatan radiasi untuk TENORM adalah :

- a. identifikasi jenis, jumlah atau kuantitas serta karakterisasi sumber limbah TENORM;
- b. proses kegiatan yang dilaksanakan dan tingkat konsentrasi radionuklida yang terkandung dalam limbah TENORM;
- c. paparan radiasi pada semua tahap pengelolaan limbah serta tingkat kontaminasi pada permukaan TENORM;
- d. dampak radiologi jangka panjang dari metode pembuangan terhadap para pekerja dan masyarakat umum serta lingkungan hidup.

Pengelolaan limbah TENORM merupakan salah satu aspek penting dalam keselamatan radiasi, karena TENORM adalah bahan radioaktif yang apabila tidak dikelola dengan baik akan dapat menimbulkan dampak radiasi yang merugikan keselamatan dan kesehatan para pekerja dan lingkungan, hal ini dapat dijelaskan pada Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir No.9 Tahun 2009 tentang intervensi terhadap paparan yang berasal dari TENORM. Dengan diaturnya masalah tersebut dalam Undang-undang, secara umum hal ini dapat dijadikan sebagai dasar hukum dalam pengawasan dan pengelolaan limbah radioaktif.

Berdasarkan data hasil penelitian, laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi kering yang disajikan pada Gambar 4.1 dan pada Tabel 4.1 nilai maksimum laju dosis gamma pada jarak 1 meter adalah sebesar $149,06 \pm 0,18 \mu\text{R/h}$ dan nilai minimum untuk laju dosis gamma adalah sebesar $142,93 \pm 0,05 \mu\text{R/h}$, sedangkan untuk laju dosis gamma pada limbah TENORM kondisi basah seperti pada Tabel 4.2 dan Gambar 4.2 nilai maksimum laju dosis gamma adalah sebesar $152,91 \pm 0,02 \mu\text{R/h}$ dan nilai minimum sebesar $147,50 \pm 0,01 \mu\text{R/h}$. Berdasarkan hasil pengukuran yang diperoleh, dapat dikatakan nilai laju dosis gamma yang terukur cukup tinggi, dimana batasan untuk dilakukan tindakan intervensi apabila konsentrasi aktivitas untuk radionuklida ^{226}Ra dan ^{232}Th lebih dari 1000 Bq/kg, dan untuk ^{40}K lebih dari 10.000 Bq/kg atau menurut API (*Asosiasi Perminyakan Amerika Serikat*) batas tindakan (*action level*) untuk paparan radiasi eksternal sebesar $0,5 \mu\text{Sv/h}$ atau setara dengan $50 \mu\text{R/h}$.

Oleh karena itu perlu dilakukan tindakan intervensi terhadap limbah TENORM. Tindakan intervensi yaitu suatu tindakan yang dilakukan untuk mengurangi dan menghindari kemungkinan terjadinya paparan kronik dan paparan darurat yang diakibatkan oleh TENORM. Contoh tindakan intervensi TENORM adalah mengumpulkan TENORM pada suatu tempat yang aman dan jauh dari aktifitas para pekerja dan masyarakat sekitar, memasang tanda bahaya radiasi, memberi tulisan peringatan agar yang tidak berkepentingan tidak mendekati limbah TENORM, memasang perisai radiasi dan lain-lain. Disamping itu perlu juga dilakukan pemantauan paparan radiasi dan radioaktivitas lingkungan secara rutin dan berkala, minimal setiap 6 bulan sekali.

Karena limbah TENORM pada penelitian ini dalam kondisi kering dan berbentuk padatan seperti pasir (tanah) berwarna coklat, sehingga potensi bahaya radiasi interna sangat besar, yaitu dimungkinkan ada debu dari TENORM yang berterbangan sehingga dapat terhirup lewat saluran pernafasan. Oleh karena itu pada saat bekerja harus menggunakan pakaian proteksi, seperti masker, sarung tangan, sepatu dan lain-lain.

4.5 Pengelolaan Limbah TENORM dalam Industri Minyak dan Gas Bumi secara Umum

Pengelolaan limbah TENORM merupakan salah satu aspek penting dalam keselamatan radiasi, karena TENORM merupakan bahan radioaktif yang apabila tidak dikelola dengan baik akan dapat menimbulkan dampak yang merugikan bagi keselamatan dan kesehatan para pekerja, masyarakat dan lingkungan. Tujuan dari pengelolaan limbah TENORM industri minyak dan gas bumi adalah membatasi paparan radiasi pengion terhadap masyarakat dan pekerja serta melindungi lingkungan dari pelepasan radioaktivitas alam atau peningkatan konsentrasi radioaktivitas alam.

Untuk memenuhi tujuan tersebut, dilakukan beberapa tindakan proteksi radiasi terhadap pengelolaan limbah radioaktif, yaitu antara lain :

1. Perawatan pipa-pipa peralatan produksi
 - a) pemantauan laju paparan di setiap peralatan produksi,
 - b) pembersihan pipa dan tangki peralatan produksi (proses *dekontaminasi*),
 - c) peralatan perlu diganti jika sudah tidak memenuhi standar daur ulang untuk dipakai lagi dalam proses produksi,
 - d) pengumpulan peralatan yang telah terkontaminasi NORM dalam daerah terkontrol diluar fasilitas produksi.
2. Metode pembuangan limbah cair (air produksi)
 - a) diinjeksi kembali ke dalam reservoir yaitu dimana air ini berasal,
 - b) pembuangan ke kolam buatan seperti *lagoon*, *pond*, dan *seepage pit*

3. Metode Pembuangan limbah *scale* dan *sludge*

- a) pembuangan limbah ke dalam sumur bekas (yaitu menempatkan TENORM padat ke dalam sumur-sumur),
- b) pembuangan tanah dangkal (digunakan untuk limbah TENORM yang jumlahnya terbatas)
- c) pembuangan tanah dalam (digunakan untuk limbah radioaktif aktivitas tinggi)

Metode pembuangan limbah TENORM harus diputuskan berdasarkan hasil analisis dampak lingkungan untuk lokasi pembuangan. Faktor-faktor seperti geologi, iklim, air tanah, air permukaan serta jarak dengan daerah pemukiman sangat mempengaruhi lokasi pembuangan. Keputusan untuk penetapan lokasi pembuangan limbah harus mempertimbangkan seluruh faktor-faktor tersebut.



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(halaman ini sengaja dikosongkan)



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan data hasil penelitian, nilai laju dosis gamma yang terukur cukup tinggi, dimana batasan untuk dilakukan tindakan intervensi apabila konsentrasi aktivitas ^{226}Ra dan ^{232}Th lebih dari 1000 Bq/kg, ^{40}K lebih dari 10.000 Bq/kg dan atau menurut *Asosiasi Perminyakan Amerika Serikat* (API), batas tindakan (*action level*) untuk paparan radiasi eksternal sebesar 0,5 $\mu\text{Sv/h}$ atau setara dengan 50 $\mu\text{R/h}$.

Oleh karena itu perlu dilakukan tindakan intervensi terhadap limbah TENORM. Tindakan intervensi yaitu suatu tindakan yang dilakukan untuk mengurangi dan menghindari kemungkinan terjadinya paparan kronik dan paparan darurat yang diakibatkan oleh TENORM. Contoh tindakan intervensi adalah mengumpulkan TENORM pada suatu tempat yang aman dan jauh dari aktifitas para pekerja dan masyarakat sekitar, memasang tanda bahaya radiasi, memberi tulisan peringatan agar yang tidak berkepentingan tidak mendekati limbah TENORM, memasang perisai radiasi dan lain-lain. Disamping itu perlu juga dilakukan pemantauan paparan radiasi dan radioaktivitas lingkungan secara rutin dan berkala, minimal setiap 6 bulan sekali

5.2 Saran

Untuk mendapatkan hasil perhitungan dan pengukuran yang optimal perlu dilakukan koreksi lepasan gas radon dan thoron sebagai koreksi hasil perhitungan secara teoritis. Selain itu perlu dilakukan pengukuran densitas dari tanah dan energi radiasi gamma dari luruhan radon dan thoron sehingga nilai absorpsi dari radiasi gamma tersebut dapat diperkirakan.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

(halaman ini sengaja dikosongkan)



UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Lampiran 1. Data Hasil Penelitian

Tabel A1. Laju Dosis Gamma pada limbah TENORM kondisi kering menggunakan Detektor Reuter Stokes RSS-112

Waktu	X ($\mu\text{R/h}$)	Waktu	X ($\mu\text{R/h}$)	Waktu	X ($\mu\text{R/h}$)
11.00 s/d 12.00 T = 43°C RH = 42%	149,8	12.00 s/d 13.00 T = 44°C RH = 40%	148	13.00 s/d 14.00 T = 45°C RH = 31%	146,3
	149,8		148		145,6
	149,6		147,9		145,6
	149,3		147,4		145,3
	149,1		147,4		145,3
	149		147		145,3
	148,6		147		144,9
	148,6		147		144,9
	148,5		146,8		144,9
148,3	146,8	144,9			
149,06 \pm 0,18 $\mu\text{R/h}$		147,33 \pm 0,15 $\mu\text{R/h}$		145,30 \pm 0,14 $\mu\text{R/h}$	

Waktu	X ($\mu\text{R/h}$)	Waktu	X ($\mu\text{R/h}$)	Waktu	X ($\mu\text{R/h}$)
14.00 s/d 15.00 T = 43°C RH = 37%	144,9	15.00 s/d 16.00 T = 42°C RH = 39%	144,1	16.00 s/d 17.00 T = 39°C RH = 42%	143,2
	145		144,1		143,1
	145		144,1		143
	144,1		143,8		143
	144,1		143,5		142,9
	144,1		143,5		142,9
	144,1		143,4		142,8
	144,1		143,4		142,8
	144,1		143,4		142,8
144,36 \pm 0,13 $\mu\text{R/h}$		143,67 \pm 0,101 $\mu\text{R/h}$		142,93 \pm 0,0448 $\mu\text{R/h}$	

Istirahat	Waktu	X ($\mu\text{R/h}$)	Waktu	X ($\mu\text{R/h}$)
	21.00 s/d 22.00 T = 26°C RH = 78%	143,3	22.00 s/d 23.00 T = 26°C RH = 79%	143,7
		143,3		143,8
		143,3		143,8
		143,3		143,9
		143,4		143,9
		143,4		143,9
		143,5		144
		143,6		144,1
		143,6		144,2
	143,6	144,2		
143,43 \pm 0,04 $\mu\text{R/h}$		143,95 \pm 0,05 $\mu\text{R/h}$		

Waktu	X ($\mu\text{R/h}$)	Waktu	X ($\mu\text{R/h}$)	Waktu	X ($\mu\text{R/h}$)
23.00 s/d 00.00 T = 26°C RH = 80%	144,2	00.00 s/d 01.00 T = 24°C RH = 81%	144,8	01.00 s/d 02.00 T = 24°C RH = 81%	145,4
	144,3		144,8		145,5
	144,4		144,9		145,6
	144,5		145		145,6
	144,6		145,1		145,6
	144,6		145,1		145,6
	144,6		145,2		145,7
	144,6		145,2		145,8
	144,7		145,3		145,8
144,7	145,3	145,9	145,9		
144,52 \pm 0,05 $\mu\text{R/h}$		145,07 \pm 0,06 $\mu\text{R/h}$		145,65 \pm 0,05 $\mu\text{R/h}$	

Waktu	X ($\mu\text{R/h}$)	Waktu	X ($\mu\text{R/h}$)	Waktu	X ($\mu\text{R/h}$)
02.00 s/d 03.00 T = 24°C RH = 81%	145,9	03.00 s/d 04.00 T = 23°C RH = 84%	146,5	04.00 s/d 05.00 T = 23°C RH = 84%	147
	146		146,5		147
	146		146,6		147,1
	146,1		146,6		147,1
	146,1		146,7		147,3
	146,2		146,7		147,3
	146,3		146,8		147,3
	146,3		146,8		147,3
	146,4		146,9		147,3
146,4	146,9	147,4	147,4		
146,17 \pm 0,06 $\mu\text{R/h}$		146,7 \pm 0,04 $\mu\text{R/h}$		147,21 \pm 0,05 $\mu\text{R/h}$	

Waktu	X ($\mu\text{R/h}$)	Waktu	X ($\mu\text{R/h}$)
05.00 s/d 06.00 T = 24°C RH = 83%	147,2	06.00 s/d 07.00 T = 25°C RH = 82%	148
	147,4		148
	147,4		148
	147,4		148
	147,6		148
	147,6		148,1
	147,7		148,1
	147,7		148,1
	147,8		148,2
147,8	148,2	148,2	
147,56 \pm 0,06 $\mu\text{R/h}$		148,07 \pm 0,03 $\mu\text{R/h}$	

Tabel A2. Laju Dosis Gamma pada limbah TENORM kondisi basah menggunakan Detektor Reuter Stokes RSS-112

Waktu	X (μR/h)	Waktu	X (μR/h)	Waktu	X (μR/h)
11.00 s/d 12.00 T = 38°C RH = 70%	149,3	12.00 s/d 13.00 T = 39°C RH = 69%	148,1	13.00 s/d 14.00 T = 41°C RH = 52%	148,7
	149,3		148,5		148,5
	149,3		148,8		148,5
	149,2		149		148,5
	149,2		149,1		148,3
	149,2		149,1		148,2
	149,1		149,1		148,1
	149,1		149,1		148,0
	149,1		149,2		148,0
149,1	149,2	148,0			
149,19 ± 0,04 μR/h		148,92 ± 0,11 μR/h		148,28 ± 0,08 μR/h	

Waktu	X (μR/h)	Waktu	X (μR/h)	Waktu	X (μR/h)
14.00 s/d 15.00 T = 42°C RH = 52%	147,9	15.00 s/d 16.00 T = 41°C RH = 49%	147,7	16.00 s/d 17.00 T = 39°C RH = 50%	147,5
	147,9		147,6		147,5
	147,9		147,6		147,5
	147,9		147,6		147,5
	147,8		147,5		147,5
	147,8		147,5		147,5
	147,7		147,5		147,5
	147,7		147,5		147,5
	147,7		147,5		147,5
147,82 ± 0,03 μR/h		147,55 ± 0,02 μR/h		147,5 ± 0,01 μR/h	

Istirahat	Waktu	X (μR/h)	Waktu	X (μR/h)
	20.00 s/d 21.00 T = 28°C RH = 64%	148,8	21.00 s/d 22.00 T = 27°C RH = 70%	149,3
		148,9		149,3
		148,9		149,4
		148,9		149,4
		149		149,5
		149		149,5
		149,1		149,6
		149,1		149,6
		149,2		149,7
	149,2	149,7		
149,01 ± 0,04 μR/h		149,50 ± 0,04 μR/h		

Waktu	X (µR/h)	Waktu	X (µR/h)	Waktu	X (µR/h)
22.00 s/d 23.00 T = 26°C RH = 74%	149,8	23.00 s/d 00.00 T = 26°C RH = 79%	150,3	00.00 s/d 01.00 T = 26°C RH = 80%	150,6
	149,8		150,3		150,7
	149,9		150,3		150,7
	149,9		150,4		150,7
	150		150,4		150,8
	150		150,4		150,8
	150,1		150,5		150,8
	150,1		150,5		150,9
150,2	150,6	150,9			
150,2	150,6	150,9			
150 ± 0,05 µR/h		150,43 ± 0,04 µR/h		150,78 ± 0,03 µR/h	

Waktu	X (µR/h)	Waktu	X (µR/h)	Waktu	X (µR/h)
01.00 s/d 02.00 T = 26°C RH = 82%	151,1	02.00 s/d 03.00 T = 25°C RH = 83%	151,4	03.00 s/d 04.00 T = 24°C RH = 84%	152
	151,1		151,4		152
	151,1		151,5		152
	151,2		151,5		152,1
	151,2		151,6		152,1
	151,3		151,7		152,1
	151,3		151,8		152,1
	151,3		151,8		152,1
	151,3		151,9		152,1
	151,3		151,9		152,1
151,22 ± 0,03 µR/h		151,65 ± 0,07 µR/h		152,07 ± 0,02 µR/h	

Waktu	X (µR/h)	Waktu	X (µR/h)	Waktu	X (µR/h)
04.00 s/d 05.00 T = 24°C RH = 84%	152,1	05.00 s/d 06.00 T = 23°C RH = 85%	152,5	06.00 s/d 07.00 T = 26°C RH = 82%	152,8
	152,2		152,5		152,8
	152,3		152,6		152,8
	152,3		152,6		152,9
	152,3		152,6		152,9
	152,3		152,6		152,9
	152,4		152,7		153
	152,4		152,7		153
	152,4		152,7		153
152,31 ± 0,03 µR/h		152,62 ± 0,03 µR/h		152,91 ± 0,2 µR/h	

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Lampiran 2. Alat dan Bahan Penelitian



Gambar B1. Limbah TENORM kondisi kering



Gambar B2. Limbah TENORM kondisi basah



Gambar B3. Proses simulasi hujan buatan



Gambar B4. Detektor Geiger Muller (Inspector)



Gambar B5. Detektor NaI(Tl) Ludlum Model 19



Gambar B6. Detektor NaI(Tl) ATOMTEC



Gambar B7. Detektor Ionization Chamber



Gambar B8. Pencacah Waktu (Timer) dan Pengukur Jarak



Gambar B9. Detektor Suhu

Tabel A3. Spesifikasi dan Jenis Detektor Surveimeter Lingkungan (Akhadi, 2000)

No	Nama Alat	Jenis Detektor	Tampilan	Rentang Ukur dan Ketelitian
1	Reuter Stokes RS-11	Detektor kamar ionisasi tekanan tinggi, volume 10 lt, tekanan 25 atm	Laju dosis digital ($\mu\text{R/h}$)	1 - 500 $\mu\text{R/h}$ $\pm 5\%$ pada 10 $\mu\text{R/h}$
2	Atomtec	Detektor NaI (TI)	Laju dosis digital ($\mu\text{Sv/h}$)	1 - 500 $\mu\text{R/h}$ $\pm 5\%$ pada 10 $\mu\text{R/h}$
3	Ludlum Model 19	Detektor NaI (TI)	Laju dosis analog ($\mu\text{R/h}$)	1 $\mu\text{R/h}$ - 5 mR/h $\pm 5\%$ pada 10 $\mu\text{R/h}$
4	Inspector	Detektor Geiger Muller jendela tipis (GM)	Laju dosis digital ($\mu\text{R/h}$)	1 - 500 $\mu\text{R/h}$ $\pm 5\%$ pada 10 $\mu\text{R/h}$
5	Mini Instrumen	Detektor Geiger Muller terkompensasi (GM)	Laju dosis analog ($\mu\text{R/h}$)	1 $\mu\text{R/h}$ - 5 mR/h $\pm 5\%$ pada 10 $\mu\text{R/h}$