

## MANAJEMEN LIMBAH NORMFFENORM DALAM KEGIATAN INDUSTRI MINYAK DAN GAS

Rini Rindayani

Pusat Pendidikan dan Pelatihan - BATAN

### ABSTRAK

MANAJEMEN LIMBAH NORMFFENORM DALAM KEGIATAN INDUSTRI MINYAK DAN GAS. Makalah ini menyajikan cara pengelolaan limbah NORMFFENORM yang berasal dari industri minyak dan gas, dalam makalah ini diuraikan mengenai asal usul NORMFFENORM, dampaknya terhadap pekerja maupun lingkungan, dan regulasi maupun teknik pengelolaan limbah NORMFFENORM. Meskipun belum ada ketentuan atau peraturan khusus yang mengatur mengenai pengelolaan limbah NORMFFENORM, tetapi pengelolaan limbahnya dapat didasarkan pada metode/standard untuk pengelolaan limbah radioaktif.

### ABSTRACT

MANAGEMENT OF NORMFFENORM WASTE IN OIL AND GAS INDUSTRIES. This paper describes how to manage NORMFFENORM waste from oil and gas industries, including the origin of the NORMFFENORM waste, the radiological aspect to worker and environment, regulation and treatment of the NORMFFENORM waste. Although there is not yet any regulation on how to manage The NORMFFENORM waste, the standard method of radioactive disposal can be applied to manage the NORMFFENORM waste.

### I. PENDAHULUAN

Potensi sumber daya alam yang terkandung dalam bumi baik di darat maupun laut merupakan aset bangsa yang sangat menjanjikan di masa yang akan datang. Pemanfaatan sumber daya alam di bidang industri memberikan keuntungan yang besar bagi negara, terutama dari hasil ekspor minyak dan beberapa komoditi tambang utama lainnya.

Namun demikian dari hasil kegiatan pengambilan komoditi tambang dan pemrosesannya lebih lanjut mengakibatkan dampak terhadap keselamatan. Dampak ini mulai dari yang bersifat lokal, seperti pencemaran badan air, tanah dan udara, perubahan bentang alam, hilangnya vegetasi

penutup tanah atau berubahnya habitat flora dan fauna sampai kepada dampak yang bersifat regional dan global.

Salah satu dari bentuk polutan yang dihasilkan dari kegiatan industri adalah terkonsentrasinya unsur radioaktif alamiah pada limbah yang dihasilkan oleh industri atau bahkan pada produk utamanya. Kegiatan industri yang memanfaatkan hasil penambangan meliputi kegiatan pengambilan dan pengolahan bahan baku yang berasal dari dalam kulit bumi. Dalam kegiatan tersebut, unsur radioaktif alam yang terkandung di dalam kerak bumi akan ikut termobilisasi dan akan terkonsentrasi selama proses pengolahan berlangsung, yang dikenal dengan NORMFFENORM.

### II. ASAL NORM

Radiasi berasal dari *terrestrial nuclear radiation* dan *secondary cosmic radiation*. *Terrestrial nuclear radiation* adalah radiasi yang berasal dari peluruhan radioaktif alam, terutama dipancarkan oleh radioaktif alam seperti uranium, thorium, radium dan lain-lain yang ada di alam. Sedangkan *secondary*

cosmic radiation adalah radiasi yang berasal dari hasil tumbukan radiasi kosmik dengan atom di udara ( seperti : oksigen, nitrogen dan hidrogen ) yang berada di lapisan atas atmosfer. Dosis radiasi tahunan rata-rata masyarakat dapat dilihat pada tabel 1, sedang deret peluruhan uranium dan thorium dapat dilihat pada tabel 2.

Tabel 1. Dosis Tahunan Rata-rata Masyarakat

Sumber radiasi alam	Dosis radiasi tahunan ( mSv )
Radiasi kosmik di laut	0,3
Radioaktif alam dalam tanah, batuan, bahan bangunan	0,3
Radioaktif alam dalam tubuh	0,4
Radioaktif dari gas radon di udara tertutup	1
Total	2

Sumber radiasi buatan	Dosis radiasi tahunan ( mSv )
Medis dan sinar-X gigi	0,40
Kedokteran nuklir	0,10
latihan radioaktif dari percobaan senjata nuklir	0,04
Sumber lain	0,02
PLTN	0,01
Total	0,6

Tabel 2. Deret U-238 dan Th-232 bersama anak urusnya

Unsur	Umur paro	Model peluruhan
U-234	$4,4 \times 10^5$ tahun	Alpha
Th-234	24,10 hari	Beta
Pa-234m	1,2 menit	Beta
U-234	$2,5 \times 10^5$ tahun	Alpha
Th-230	$7,7 \times 10^4$ tahun	Alpha
Ra-226	$1,6 \times 10^3$ tahun	Alpha, gamma
Rn-222 (gas)	3,8 hari	Alpha
Po-218	3,05 menit	Alpha
Pb-214	26,8 menit	Beta, gamma
Bi-214	19,9 menit	Beta, gamma
Po-214	$1,6 \times 10^{-4}$ detik	Alpha
Pb-210	22,3 tahun	Beta

Unsur	Umur paro	Model peluruhan
Bi-210	5 hari	Beta
Po-210	138 hari	Alpha
Pb-206	stabil	

Tabel 2. Deret U-238 dan Th-232 bersama anak urusnya

Unsur	Umur paro	Model peluruhan
Th-232	$1,4 \times 10^{10}$ tahun	Alpha
Ra-228	5,8 tahun	Beta
Ac-228	6,13 jam	Beta, gamma
Th-228	1,9 tahun	Alpha, gamma
Ra-224	3,64 hari	Alpha, gamma
Rn-220 (gas)	55 detik	Alpha
Po-216	0,15 detik	Alpha
Pb-212	10,6 jam	Beta, gamma
Bi-212	60,6 menit	Alpha, beta, gamma
Tl-208	3,1 menit	Beta, gamma
Po-212	$3 \times 10^{-7}$ detik	Alpha
Pb-208	stabil	

Unsur-unsur radioaktif alam yang terkonsentrasi dalam suatu kegiatan industri disebut NORM ( Naturally Occurring Radioactive Material ) atau TENORM ( Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Material ). Mekanisme pembentukan NORM pada setiap industri berbeda-beda tergantung pada jenis kegiatan industri tersebut. Di Indonesia terdapat beberapa industri yang berpotensi menghasilkan NORM.

NORM yang dihasilkan dari limbah industri mempunyai volume yang besar tetapi dengan aktivitas rendah. Sebagian NORM menjadi limbah yang terbuang, namun ada pula yang terikut dalam barang produksi yang digunakan secara komersial.

Proses terbentuknya NORM/TENORM dari kegiatan industri minyak dan gas:

Pada industri minyak dan gas bumi ada dua jenis produk utama yang terbentuk yaitu *scale* dan *sludge*. *Scale* merupakan garam-garam sulfat dan karbonat yang mengendap pada permukaan dalam peralatan produksi, seperti BaSO<sub>4</sub>, CaSO<sub>4</sub> dan CaCO<sub>3</sub>. Sedangkan *sludge* adalah campuran senyawa-senyawa organik dan mineral padat dalam air dengan hidrokarbon cair yang terpisah dari minyak dan gas pada alat-alat produksi. Senyawa-senyawa uranium dan thorium umumnya tidak larut dalam air. Sehubungan dengan itu uranium dan thorium akan tertinggal dalam sumur bawah tanah (*underground reservoir*) pada waktu minyak dan gas ditarik ke permukaan. Bersamaan dengan tertariknya minyak dan gas, air yang terdapat dalam reservoir juga ikut tertarik ke permukaan. Beberapa senyawa radium dan anak luruh radium yang bersifat larut dalam air akan ikut terbawa bersama air. Dalam proses pengambilan tersebut maka unsur-unsur Ba dan Ca akan mengendap dalam bentuk BaSO<sub>4</sub>, CaSO<sub>4</sub> dan CaCO<sub>3</sub>. Oleh karena sifat kimia Ra sama dengan Ba dan Ca (sama-sama golongan IIA) maka Ra juga akan ikut mengendap dan menyebabkan terbentuknya *scale*.

Beberapa hal yang dapat menyebabkan terbentuknya *scale* adalah :

- *mixing of incompatible water*
- perubahan temperatur
- perubahantekanan
- *impurities*
- *additives*
- perbedaan laju alir
- *changes in water acidity*
- *fluid expansion*
- *gas evaporation*

Ketebalan *scale* sekitar beberapa milimeter sampai 1 inci. Kadang kala keadaan tersebut dapat menyebabkan penyumbatan aliran pipa sampai diameter 10,1 em, Norm yang dihasilkan dari industri minyak dan gas terutama mengandung Ra-226, Ra-228 beserta anak luruhnya. Waktu paruh dari

Ra-226 adalah 1600 tahun, sedang Ra-228 adalah 5,8 tahun. Konsentrasi Ra di dalam *scale* bervariasi tergantung pada struktur geologi tempat asalnya. Umumnya konsentrasi Ra-226 lebih tinggi dari Ra-228. Karena Ra-228 meluruh menjadi Th-228 dan Ra-226 meluruh menjadi Pb-210 dan Po-210 melalui radon (Ra-222) maka di dalam *scale* akan ditemukan Th-228, Pb-210 dan Po-210. Konsentrasi radionuklida dalam *scale* bervariasi seperti dapat dilihat dalam tabel 1

Tabel 1. Konsentrasi rata-rata radionuklida dalam *scale* minyak dan gas

Radionuklida	Konsentrasi ( Bq/kg )
Ra-226	13300
Pb-210	13300
Po-210	13300
Ra-228	4440
Th-228	4440

Proses pembentukan *sludge* sama halnya dengan pembentukan *scale*. Karena perubahan temperatur dan tekanan, padatan-padatan yang terlarut akan mengendap dalam sistem produksi. Endapan-endapan yang terbentuk berupa material yang berminyak dan lentur. *Sludge* sering mengandung senyawa-senyawa silika tetapi kadang-kadang juga mengandung sejumlah barium. Konsentrasi radionuklida di dalam *sludge* bervariasi sekitar level background sampai beberapa ratus pCi/gr dengan konsentrasi tertinggi pada daerah separator dan sekitarnya. Konsentrasi radionuklida dalam *sludge* dapat dilihat dalam tabel 2.

Tabel 2. Konsentrasi radionuklida dalam *Sludge*

Radionuklida	Konsentrasi ( Bq/kg )
Ra-226	2070
Pb-210	2070
Po-210	2070
Ra-228	700
Th-228	700

### III. DAMPAK NORM

Dampak NORM terhadap pekerja. Dampak radiologi NORM terhadap pekerja dapat berupa paparan radiasi eksterna maupun intema. Selama kegiatan operasi berjalan normal, potensi bahaya radiasi hanya berasal dari paparan radiasi eksterna dari radionuklida pemancar gamma yang terdapat di dalam NORM yang mengendap pada fasilitas industri seperti pipa, tangki atau vessel. Akan tetapi pada waktu sistem peralatan dibuka selama produksi tidak berjalan (*shutdown*) atau pada waktu penggantian atau perbaikan (*maintenance*), pada waktu pencucian fasilitas, pekerja akan berhubungan langsung dengan NORM, sehingga potensi bahaya radiasi bukan hanya eksterna tetapi juga intema.

Potensi bahaya radiasi pada industri penghasil NORM dapat diterima manusia melalui beberapa jalur berikut :

- Eksterna oleh radionuklida-radionuklida pemancar gamma dari fasilitas produksi yang terkontaminasi NORM
  - Interna oleh partikel NORM yang tersuspensi dan terbawa masuk ke dalam tubuh pada waktu bernafas ( inhalasi )
- Intema oleh anak luruh radon ( Rn-222 ) dan thoron ( Rn-220 ) yang terbawa masuk ke dalam tubuh pada waktu bernafas ( inhalasi ).

Sebagai akibatnya mereka yang terlibat langsung ( pekerja industri ) dan mereka yang tidak terlibat langsung dalam kegiatan industri ( masyarakat sekitarnya ) akan ikut merasakan dampaknya. Keselamatan dan kesehatan kerja sangat penting bagi unjuk kerja suatu industri. Untuk memperkirakan dampak radiologi NORM yang dihasilkan oleh industri terhadap pekerja, masyarakat sekitar dan lingkungan, perlu diketahui terlebih dahulu seberapa tinggi tingkat radioaktivitas di dalam NORM tersebut dan fasilitas mana saja atau daerah kerja mana saja yang terkontaminasi NORM.

Dampak NORM Terhadap Lingkungan. Menurut beberapa penelitian NORM dapat memberikan kontribusi kenaikan radioaktif alam di lingkungan. Sebagai contoh industri pupuk fosfat di Rotterdam Belanda dilaporkan telah menghasilkan phosphogypsum 2 juta ton per tahun dan limbah ini dibuang ke sungai Rhein sehingga menyebabkan terlepasnya sejumlah bahan radioaktif alam seperti U-238, Ra-226, Pb-210, dan Po-210. Sebagai akibatnya ikan-ikan dari sungai Rhein mengandung Po-210 sebanyak 10 - 50 Bq/kg dan nilai tersebut jauh lebih tinggi 4 - 5 kali dibandingkan dengan ikan-ikan dari kawasan lain. Disamping itu telah terjadi pula kenaikan dosis efektif tahunan individual mencapai 150  $\mu$ Sv. Ra-226 pada contoh air dan sedimen sungai Rhein mencapai 10 - 50 kali lebih tinggi dibandingkan dengan kawasan lain.

Industri pupuk fosfat di Spanyol yang menghasilkan phosphogypsum sebanyak 0,4 juta ton per tahun juga dilaporkan telah membuang limbah cairnya ke pesisir Tinto dan sungai Odiel. Sebagai akibatnya dosis efektif tahunan untuk kelompok kritis dilaporkan telah mencapai 60  $\mu$ Sv, terutama melalui jalur konsumsi ikan dan crustacea. Sedangkan industri pupuk fosfat di Perancis telah menghasilkan phosphogypsum lebih dari 3 juta ton per tahun tetapi limbahnya dikubur di pesisir Seine.

Pencemaran lingkungan merupakan salah satu masalah penting yang sedang dihadapi oleh Indonesia dewasa ini. Untuk melestarikan fungsi lingkungan hidup diperlukan pengelolaan lingkungan hidup yang meliputi kebijaksanaan penataan, pemanfaatan, pengembangan, pemeliharaan, pemulihan dan pengendalian lingkungan hidup.

### IV. REGULASI NORM

Limbah NORM/ENORM akhir-akhir ini mulai diperhatikan di negara-negara maju.

Limbah ini tidak hanya berasal dari aktivitas pemanfaatan energi nuklir saja, namun juga sering ditemukan di industri fosfat, minyak dan gas, serta industri lainnya. Akibat bervariasinya situasi yang dihadapi maka limbah NORM harus ditangani secara hati-hati dan kasus per kasus berdasarkan pada prinsip proteksi radiasi dan kaidah umum yang berlaku.

Banyak negara telah menerapkan regulasi untuk limbah NORM dan TENORM dengan memberikan suatu batas yang disebut dengan *exemption level* atau batas yang dikecualikan yang secara sederhana memberikan suatu kriteria apakah limbah NORM dapat dikatakan sebagai bahan radioaktif atau bukan.

Batas pengecualian tersebut tidak dapat digunakan untuk penanganan limbah NORM jangka panjang. Di negara maju permasalahan lebih difokuskan pada penetapan regulasi, penanganan limbah NORM di masa lalu dan pencarian lokasi pembuangan limbah NORM. Hal ini menjadi sangat kompleks, karena menyangkut faktor sosial dan ekonomi. Banyak negara sulit untuk menanggung biaya penanganan limbah NORM, bahkan di negara-negara berkembang belum begitu memperhatikan secara serius mengenai masalah NORM.

Sampai saat ini IAEA belum membuat suatu *guide line* terhadap limbah NORM dan TENORM. IAEA sedang melakukan diskusi dengan ICRP serta institusi lain untuk menetapkan regulasi mengenai batas radiasi yang boleh ada pada bahan komoditi, residu maupun limbah industri.

Dalam *Basic Safety Standard* ( BSS ) di beberapa negara anggota. Uni Eropa disebutkan nilai *exemption level* untuk nuklida tertentu, seperti Co-60, Cs-137 dan Ra-226 adalah 10 Bq/gram, tetapi ini hanya

berlaku untuk kegiatan pemanfaatan energi nuklir dan tidak dihubungkan dengan industri NORM.

Informasi terakhir pada seminar NORM II di Jerman disebutkan nilai *exemption level* untuk Jerman adalah 500 Bq/gram untuk aktivitas total NORM, dan 65 Bq/gram untuk Ra-226. Sedang Belanda adalah 100 Bq/gram, Norwegia 10 Bq/gram untuk Ra-226, Ra-228 dan Pb-210 dari industri minyak dan gas.

Indonesia belum mempunyai kriteria *exemption level* untuk limbah NORM dari industri.

Saat ini yang mengatur mengenai pengelolaan limbah radioaktif adalah Peraturan Pemerintah Nomor 27 tahun 2002 yang berisi antara lain klasifikasi limbah, manajemen perizinan, pengolahan, pengangkutan, penyimpanan limbah radioaktif, program jaminan kualitas, pengelolaan dan pemantauan lingkungan, pengolahan limbah radioaktif tambang bahan galian nuklir dan tambang lainnya, program dekomisioning, serta penanggulangan kecelakaan nuklir dan atau radiasi.

Dalam PP No. 27 tahun 2002 juga diatur mengenai kemungkinan adanya limbah yang berasal dari tambang non nuklir, sehingga bila pada suatu tambang non nuklir dianalisis ternyata ditemukan limbah radioaktif yang disebabkan oleh penambangan tersebut maka hasil analisis wajib disampaikan kepada Badan Pengawas Tenaga Nuklir untuk dilakukan tindakan yang diperlukan yang berhubungan dengan keselamatan radiasi maupun lingkungan.

## V. PENGELOLAAN LIMBAH NORM / TENORM

Sampai saat ini belum ada petunjuk yang jelas mengenai bagaimana mengelola limbah NORM, bagaimana melakukan remediasi lingkungan lokasi dan

lain sebagainya. Kebijakan umum yang diambil adalah pemerintah dan institusi terkait harus bersifat fleksibel dalam menangani kasus per kasus limbah NORM/TENORM.

Prinsip International Atomic Energy Agency (IAEA) dalam penanganan limbah berwaktu paruh panjang adalah isolasi limbah radioaktif dengan sistem penghalang ganda, termasuk pembuangan tanah dalam (*deep geological disposal*) dan dekat permukaan (*near surface disposal*).

Secara prinsip tidak ada perbedaan persyaratan dalam pembuangan limbah NORM/TENORM dengan limbah radioaktif. Untuk limbah radioaktif yang masuk kategori aktivitas rendah dan sedang harus memenuhi persyaratan sebagai berikut :

Lokasi pembuangan limbah radioaktif tidak dekat dengan lokasi persuplai air minum masyarakat

Lokasi pembuangan limbah dilengkapi dengan sistem saluran air sehingga tidak akan menimbulkan genangan air

Tanah lokasi mempunyai kapasitas yang cukup seperti halnya kapasitas pertukaran ion. Kedalaman pembuangan limbah harus selalu memperhatikan water tabel

Aliran air tanah pada lokasi limbah bergerak lambat, sekitar beberapa centimeter perhari

Tanah lokasi pembuangan dimiliki oleh negara.

Pembuangan limbah NORM harus aman sesuai dengan peraturan keselamatan. Limbah NORM dari industri minyak dan gas termasuk zat radioaktif dengan aktivitas jenis rendah (*low specific activity*) dan penanganan serta pembuangan limbah tersebut harus sesuai dengan peraturan radioaktif.

Beberapa metode pembuangan limbah NORM yang digunakan di beberapa negara adalah sebagai berikut :

Pembuangan *onshore*

*landspreading*

penyebaran sludge dan scale ke permukaan tanah terbuka. Sludge dan scale dengan aktivitas jenis radium sampai 4,4 Bq/gram dapat disebar ke permukaan tanah sampai ketebalan 0,63 cm.

*Landspreading with dilution*

Limbah NORM dicampur tanah dengan menggunakan peralatan agricultural. Sludge dan scale dengan aktivitas jenis radium sampai 9,6 Bq/gram dapat disebar sampai ketebalan 2,5 cm kemudian dilakukan pengenceran dengan tanah setebal 17,8 cm dan total ketebalan 20,3 cm.

*Burial with unrestricted site use*

Limbah NORM dikubur dalam tanah di daerah yang tidak terlarang. Sludge, scale dan peralatan yang mengandung limbah scale dengan aktivitas jenis radium sampai I ; 4,8 ; dan 16,8 Bq/gram dapat dikubur dengan kedalaman 4,6 meter dari permukaan tanah, untuk meminimalkan bahaya erosi. Bila limbah NORM lebih banyak mengandung Ra-228 maka ketebalan penutup/pengungkung dapat lebih tipis dari NORM yang lebih banyak mengandung Ra-226. NORM dengan kandungan Ra-228 akan menghasilkan gas radon-220 yang mempunyai waktu paruh pendek ( 55 detik ), dengan demikian radon-220 akan dapat terkungkung dalam tanah liat basah hanya dengan ketebalan kurang dari 1 em.

*Commercial oil industry waste facility*

Pembuangan NORM dalam fasilitas limbah industri komersial diperbolehkan apabila kandungan limbah NORM kurang dari 7 % dari volume total limbah. Sludge, scale dan peralatan yang mengandung limbah scale dengan aktivitas jenis radium sampai 15, 67 dan 229 Bq/gram dapat dikubur dalam fasilitas limbah industri komersial dengan kedalaman 4,6 meter dari permukaan tanah.

*Commercial NORM waste facility*

Tempat pembuangan limbah NORM didesain untuk menampung limbah NORM dalam jangka waktu lama dan mempunyai monitoring permanen. Sludge, scale dan peralatan yang mengandung limbah scale dengan aktivitas jenis radium 37, 167 dan 2520 Bq/gram dapat disimpan dalam fasilitas pembuangan limbah NORM komersial.

#### *Commercial low level radioactive waste facility*

Sludge, scale dan peralatan yang mengandung limbah scale dengan aktivitas jenis radium 1850, 1850 dan 3700 Bq/gram dapat disimpan dalam fasilitas limbah radioaktif tingkat rendah.

#### *Plugged and abandoned well*

Well abandonment operations merupakan salah satu peluang untuk membuang limbah NORM. Sludge, scale dan peralatan tubular yang mengandung scale NORM dengan aktivitas jenis radium sampai 3700 Bq/gram dapat ditempatkan dalam sumur selama operasi plugging dan abandonment. Metode ini jarang dilakukan karena sumur yang cocok tidak selalu tersedia.

#### *Well injection and hydraulic fracturing*

Sludge dan scale yang mempunyai aktivitas jenis radium sampai 3700 Bq/gram dapat diinjeksikan dan difrakturasi secara hidrolik ke dalam formasi yang diisolasi secara geologi dan mekanik dari reservoir air minum.

#### *Pembuangan offshore*

Metode *plugged and abandoned well* dan *Well injection and hydraulic fracturing* juga dapat digunakan untuk pembuangan *offshore*.

#### *Pembuangan scale ke laut*

Metode ini dapat digunakan asalkan ukuran scale sedemikian rupa sehingga dapat mempercepat penyebaran (ukuran partikel maksimum 1 mm) dan pembuangan limbah NORM ke laut yang berasal dari instalasi offshore maupun onshore.

Dampak radiologi yang disebabkan oleh pembuangan scale ke laut dapat diabaikan, karena :

Scale adalah zat radioaktif dengan aktivitas jenis rendah yang dampak negatifnya sangat rendah sesuai dengan tingkat radiasinya.

Gerakan arus, gelombang laut maka partikel scale akan tersebar dan partikel scale dengan low surface density akan berada di dasar laut

Pembuangan partikel scale ke air laut yang hangat dapat melarutkan partikel tersebut.

#### V. KESIMPULAN

Pengelolaan limbah NORM dan TENORM menjadi perhatian beberapa negara maju. Namun demikian belum ada peraturan yang mengatur mengenai limbah NORM dan TENORM. Beberapa negara maju mempunyai pengelolaan limbah NORM dan TENORM yang berbeda-beda, disesuaikan dengan kondisi negara tersebut. Pada prinsipnya pengelolaannya hampir sama dengan limbah radioaktif berwaktu paruh panjang.

#### DAFTAR PUSTAKA

1. Wisnubroto, Djarot S., Pengelolaan Limbah NORM / TENORM dari Kegiatan Industri Non Nuklir, P2PLR-BATAN, Prosiding Seminar Aspek Keselamatan Radiasi dan Lingkungan pada Industri non Nuklir, Jakarta 18 Maret 2003.
2. Wiharto, Kunto, Syarbaini, Potensi NORM pada Industri Non-Nuklir Di Indonesia, P3KRBIN-BATAN, Prosiding Seminar Aspek Keselamatan Radiasi dan Lingkungan pada Industri non Nuklir, Jakarta 18 Maret 2003
3. Guidelines for Naturally Occurring Radioactive Material, APPEA, March, 2002