

BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR
REPUBLIC INDONESIA

**KEPUTUSAN KEPALA
BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR
NOMOR : 03/Ka-BAPETEN/V-99
TENTANG
KETENTUAN KESELAMATAN UNTUK
PENGELOLAAN LIMBAH RADIOAKTIF**

KEPALA BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR,

- Menimbang :
- a. bahwa pemanfaatan zat radioaktif di bidang penelitian, kesehatan dan industri semakin meningkat;
 - b. bahwa pemanfaatan tenaga nuklir pada huruf a di atas dapat menghasilkan limbah radioaktif yang harus dikelola untuk menjamin kesehatan dan keselamatan pekerja, masyarakat dan lingkungan hidup;
 - c. bahwa sehubungan dengan huruf a dan b di atas, maka perlu ditetapkan Keputusan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir tentang Ketentuan Keselamatan Untuk Pengelolaan Limbah Radioaktif.
- Mengingat :
1. Undang-undang Nomor 10 Tahun 1997;
 2. Peraturan Pemerintah Nomor 12 Tahun 1975;
 3. Peraturan Pemerintah Nomor 13 Tahun 1975;
 4. Keputusan Presiden Nomor 23 Tahun 1997;
 5. Keputusan Presiden No. 76 Tahun 1998;
 6. Keputusan Presiden No. 161/M Tahun 1998.

MEMUTUSKAN :

Menetapkan :

PERTAMA : Keputusan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Tentang Ketentuan Keselamatan Untuk Pengelolaan Limbah Radioaktif, sebagaimana tersebut dalam Lampiran Keputusan ini.

KEDUA : Keputusan ini mulai berlaku pada tanggal ditetapkan.

Ditetapkan di J a k a r t a
pada tanggal 5 Mei 1999

Kepala,

ttd

DR.Mohammad Ridwan M.Sc., APU

Salinan sesuai dengan aslinya

Kepala Direktorat
Peraturan Keselamatan Nuklir,

Drs. Martua Sinaga
NIP.330002326

LAMPIRAN

**KEPUTUSAN KEPALA
BADAN PENGAWAS TENAGA NUKLIR**

NOMOR : 03/Ka-BAPETEN/V-99

TENTANG

**KETENTUAN KESELAMATAN PENGELOLAAN
LIMBAH RADIOAKTIF**

DAFTAR ISI

	halaman
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1. Tujuan	1
1.2. Ruang Lingkup.....	1
BAB 2. PENGAWASAN TERHADAP PEMANFAATAN ZAT RADIOAKTIF DAN PEMBUANGAN LIMBAH RADIOAKTIF	3
2.1. Pembatasan pemanfaatan zat radioaktif	3
2.2. Pembuangan limbah radioaktif secara perorangan dan kolektif	3
2.3. Penilaian akibat pembuangan limbah radioaktif dan penentuan nilai batas yang diizinkan	3
2.4. Nilai batas yang diizinkan untuk pembuangan ke saluran tertutup	4
2.5. Batas yang diizinkan untuk penguburan dalam tanah oleh setiap pemanfaat zat radioaktif, penggunaan sistem pembuangan limbah perkotaan dan industri	6
2.6. Batas yang diizinkan untuk insinerasi	7
BAB 3. PENGELOLAAN LIMBAH ZAT RADIOAKTIF OLEH PEMANFAAT	8
3.1. U m u m	8
3.2. Prosedur pengumpulan limbah radioaktif	9
3.3. Limbah udara	12
3.4. Pemindahan dan pengosongan tempat limbah radioaktif	13
3.5. Cara membuang ke saluran pembuangan	14
BAB 4. PROSEDUR PENANGANAN LIMBAH RADIOAKTIF YANG BIASANYA TIDAK DIBUANG SENDIRI OLEH PARA PEMANFAAT ZAT RADIOAKTIF	15
4.1. U m u m	15
4.2. Pengolahan limbah padat	15
4.3. Pengolahan limbah cair	17
BAB 5. METODA PENYIMPANAN DAN PENGUNGKUNGAN LINGKUNGAN DARI LIMBAH RADIOAKTIF	23
5.1. U m u m	23
5.2. Penyimpanan sementara	24
5.3. Penyimpanan jangka panjang	24

5.4.	Pengungkungan lingkungan dari pembuangan limbah radioaktif padat dan cair dalam tanah	25
5.5.	Pembuangan ke laut	26
5.6.	Pemonitoran sehubungan dengan pembuangan limbah radioaktif ke lingkungan	26

LAMPIRAN :	MACAM-MACAM LIMBAH SESUAI DENGAN PEMANFAATAN ZAT RADIOAKTIF	27
------------	---	----

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Tujuan

1.1.1. Ketentuan ini dimaksudkan sebagai petunjuk kerja mengenai pengelolaan limbah radioaktif bagi para pemanfaat zat radioaktif, atau instansi yang berkepentingan dengan pengelolaan limbah radioaktif baik secara perorangan maupun kolektif.

1.1.2. Ketentuan ini membahas dua sistem pengelolaan limbah radioaktif. Pertama, pembuangan limbah radioaktif yang dilaksanakan seluruhnya oleh para pemanfaat secara perorangan. Dalam sistem ini, para pemanfaat secara perorangan menyimpan limbahnya sendiri atau membuang sendiri, dengan memakai proses peluruhan, penguburan atau pembuangan. Kedua, pembuangan limbah radioaktif dilaksanakan secara kolektif oleh suatu instalasi pengolahan limbah. Dalam sistem ini, para pemanfaat mengirimkan limbahnya (biasanya belum diolah), ke tempat pembuangan dari instalasi khusus pengelolaan limbah, yang akan mengolah limbah dari para pemanfaat secara lebih efisien, didekontaminasi atau dipisahkan dan disimpan.

1.2. Ruang Lingkup

1.2.1. Ruang lingkup ketentuan ini terbatas hanya meliputi limbah radioaktif yang berasal dari para pemanfaat zat radioaktif. Ketentuan ini tidak berlaku untuk pengelolaan limbah radioaktif yang berasal dari operasi reaktor nuklir, pada tambang dan instalasi pengolahan uranium, yang akan diatur sendiri .

1.2.2. Limbah radioaktif adalah zat radioaktif dan bahan bekas serta alat-alat yang telah terkena zat radioaktif atau menjadi radioaktif karena dipergunakan dalam kegiatan nuklir dan zat radioaktif serta bahan bekas tersebut tidak dipergunakan lagi. Bahan bekas tersebut dapat berupa benda padat, seperti kertas penyerap, kain pembersih bekas jarum suntik bekas atau alat-alat terbuat dari gelas yang telah digunakan untuk penanganan zat-zat radioaktif atau pernah digunakan untuk menampung larutan radioaktif, termasuk bangkai binatang percobaan. Limbah radioaktif tersebut mungkin berbentuk cairan yang berasal dari air cucian benda padat yang terkontaminasi, atau cairan zat radioaktif yang sengaja dibuang, atau ekskreta dari pasien yang mengalami pemeriksaan dan pengobatan dengan zat radioaktif, termasuk ekskreta dari binatang percobaan, termasuk pula aerosol atau gas yang timbul karena penguapan cairan atau dari pembakaran bahan yang dapat terbakar. Lampiran

ketentuan ini memuat daftar tipe, jumlah dan penggunaan zat radioaktif, serta tipe limbah yang dapat ditimbulkan.

- 1.2.3. Untuk melindungi dan menjamin keselamatan anggota masyarakat secara maksimum perlu adanya ketentuan yang menjelaskan pengelolaan limbah radioaktif bagi para pemanfaat zat radioaktif. Bab II dari ketentuan ini menguraikan secara singkat mengenai sifat dan ruang lingkup pengawasan yang diperlukan, khususnya untuk memberikan penetapan batas-batas yang diizinkan untuk pembuangan zat radioaktif.
- 1.2.4. Hanya prosedur yang sederhana dan telah terbukti daya gunanya dapat digunakan oleh para pemanfaat zat radioaktif. Sedangkan prosedur yang lebih rumit hanya diperuntukkan bagi instalasi khusus pengelolaan limbah radioaktif.
Bab III memuat prosedur pengelolaan limbah yang menyangkut para pemanfaat seperti pengumpulan, pemindahan, penyimpanan limbah cair dan padat, pembuangan dan penguburan limbah aktivitas rendah yang diawasi, dan dekontaminasi gas buangan.
- 1.2.5. Bab IV memuat metoda-metoda yang lebih rumit, yang diperuntukkan instalasi khusus pengelolaan limbah sebagai penjelasan pokok tentang cara kompresi, evaporasi, insinerasi (pembakaran), pengolahan kimia dan penukar ion.
- 1.2.6. Bab V memuat syarat penyimpanan sementara maupun jangka panjang serta pembuangan limbah radioaktif dari para pemanfaat zat radioaktif. Bagian mengenai penyimpanan dan pembuangan ke dalam tanah dari limbah cair maupun padat menekankan pentingnya penyelidikan pendahuluan dari keadaan lingkungannya.

BAB 2

PENGAWASAN TERHADAP PEMANFAATAN ZAT RADIOAKTIF DAN PEMBUANGAN LIMBAH RADIOAKTIF

2.1. Pembatasan pemanfaatan zat radioaktif

2.1.1. Oleh karena zat radioaktif mengandung potensi untuk menimbulkan bahaya radiasi, maka telah ditetapkan bahwa setiap pemanfaatan zat radioaktif harus mematuhi peraturan pemerintah dan ketentuan lain yang dikeluarkan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir.

Hal tersebut terutama mengingat bahwa bahaya radiasi dapat menyebar dari daerah di mana zat radioaktif tersebut tersimpan atau digunakan dan akan tetap ada dalam jangka waktu yang lama.

2.1.2. Sistem perizinan dan penindakan terhadap pelanggaran ketentuan pemanfaatan zat radioaktif termasuk pengawasan terhadap pengadaan zat radioaktif, merupakan usaha pengawasan yang efektif terhadap pemanfaatan dan pembuangan zat radioaktif. Undang-undang Nomor 10 Tahun 1997, serta peraturan pelaksanaannya merupakan sumber hukum dari sistem perizinan dan pengawasan pemanfaatan zat radioaktif.

2.2. Pembuangan limbah radioaktif secara perorangan dan kolektif

Pengelolaan limbah radioaktif dapat dilakukan seluruhnya oleh setiap pemanfaat zat radioaktif atau dikirimkan oleh pemanfaat ke instalasi khusus yang oleh pemerintah ditetapkan sebagai instalasi yang berwenang untuk mengolah dan mengelola limbah radioaktif untuk diolah dan dibuang atau disimpan. Proses pengolahan tersebut meliputi proses insinerasi dan atau pemampatan dalam hal limbah padat, dan evaporasi, penukar ion atau proses kimia lainnya untuk limbah cair.

Instalasi khusus tersebut harus mempunyai fasilitas untuk menyimpan dalam jangka lama atau mengubur limbah padat, mempunyai tangki penampung limbah cair yang berkadar rendah dan tangki khusus untuk limbah cair berkadar tinggi. Perlu diingat bahwa bahaya dari radionuklida bergantung pada toksisitas terhadap manusia, bentuk fisika dan kimia, dan kemampuannya untuk mencemarkan lingkungan.

2.3. Penilaian akibat pembuangan limbah radioaktif dan penentuan nilai batas yang diizinkan

2.3.1. Pertimbangan pokok untuk setiap pengelolaan limbah radioaktif ditujukan terhadap perlindungan kesehatan manusia. Menurut Komisi International tentang Proteksi Radiologi (ICRP) dan kelompok-kelompok ahli lainnya seseorang dapat menerima dosis radiasi yang kecil tanpa memberikan

risiko kelainan somatik dan genetik yang berarti. Namun demikian setiap usaha yang praktis harus ditujukan untuk mengurangi penyinaran radiasi yang diterima menjadi sekecil mungkin.

2.3.2. Tujuan peraturan pengawasan adalah untuk menentukan nilai batas pembuangan zat radioaktif ke lingkungan.

Harus dipertimbangkan adanya proses dispersi dan rekonsentrasi zat radioaktif di lingkungan, dan harus diperhitungkan sumber-sumber penyinaran radiasi lainnya, misalnya kontaminasi disebabkan jatuhnya radioaktif. Faktor keselamatan harus digunakan untuk menampung segala perkiraan dalam perhitungan.

2.3.3. Meskipun Kadar Tertinggi Yang Diizinkan (KTD), ditentukan hanya untuk air dan udara, harga kadar tertinggi untuk air dapat digunakan untuk menghitung jumlah tertinggi harian yang diizinkan masuk ke dalam tubuh, dinyatakan dalam microcuri yaitu dengan mengalikan KTD air dengan 2200 yaitu bilangan yang menyatakan jumlah air dalam milliliter yang rata-rata masuk setiap hari.

Harga tersebut menunjukkan jumlah tertinggi yang diizinkan masuk ke dalam tubuh untuk semua jenis sumber radiasi dengan pengertian tidak ada radiasi dari penyinaran luar. Perlu diperhatikan bahwa organisme yang dapat dimakan seringkali mengkonsentrasikan radionuklida dari lingkungan misalnya dalam lingkungan air tawar yang sangat kekurangan kadar fosfor alam, namun daging ikan dapat mengandung kadar fosfor-32 50.000 kali lebih besar tiap gramnya dibandingkan dengan kadar fosfor tempat ikan itu diambil.

Dilain pihak beberapa jenis isotop tidak terkonsentrasi secara ekstensif oleh jasad hidup.

2.3.4. Keterangan yang diperlukan untuk membuat perkiraan yang terinci dari penyinaran eksterna dan panyinaran interna jarang sekali tersedia secara terinci karena itu perlu dilakukan penelitian khusus untuk mengumpulkan data geologi, hidrologi, klimatologi, meteorologi dan data lainnya, serta keterangan tentang produksi dan konsumsi bahan makanan. Demikian juga keterangan mengenai tata guna tanah untuk industri dan rekreasi dan lain-lain penggunaan.

2.4. Nilai batas yang diizinkan untuk pembuangan ke saluran tertutup

2.4.1. Pada pembuangan ke saluran tertutup, berbagai faktor yang berikut ini perlu diperhatikan :

- a. Kontaminasi pada bak cuci, saluran air, tempat kontrol dan saluran tertutup yang akan menimbulkan bahaya pada waktu parbaikan.
- b. Kontaminasi pada saluran tertutup, yang dapat menimbulkan bahaya bagi orang yang bekerja di dalam saluran itu.

- c. Cara pengolahan, bila dilakukan terhadap air buangan dan efluen dari cairan yang diolah yang terkontaminasi, yang mungkin mempengaruhi pemakaian atau pembuangan berikutnya.
 - d. Kemungkinan terkumpulnya radionuklida tertentu pada lapisan filter atau pada bagian lain dari sistem pengolahan air buangan.
 - e. Kemungkinan digunakannya lumpur air buangan.
- 2.4.2. Setiap zat radioaktif yang dibuang, tingkah lakunya mungkin berbeda-beda, sehingga dapat menimbulkan bahaya radiasi. Oleh karena itu sukar untuk menentukan nilai batas yang berlaku secara umum. Perlu diperhitungkan pengenceran zat radioaktif dengan cara :
- a. Penambahan air yang banyak pada waktu pembuangan ke dalam bak cuci atau pipa saluran pengenceran;
 - b. Dengan larutan buangan lain yang tidak radioaktif yang berasal dari fasilitas yang sama; dan
 - c. Pengenceran yang dialami oleh saluran yang terkontaminasi di dalam saluran penampungan dan saluran utama.
Perlu juga diperhitungkan apakah pemanfaatan zat radioaktif lain akan membuang ke dalam sistem pembuangan yang sama.
- 2.3.4. Di daerah yang padat penduduknya, air buangan dari daerah itu dapat memberikan faktor pengenceran yang sangat tinggi, sedangkan di daerah yang jarang penduduknya faktor pengencerannya rendah. Dianjurkan agar dilakukan penelitian terhadap saluran air dan pemanfaatan saluran air ke arah hilir sebelum merencanakan cara-cara pembuangan.
- 2.4.4. Dalam hal lumpur buangan digunakan sebagai pupuk, walaupun telah terbukti bahwa radionuklida seperti strontium radioaktif, yang lebih cepat dapat terserap oleh tanaman dari pada isotop lain, tidak banyak terkandung dalam lumpur tidak diperkenankan tanpa diteliti terlebih dahulu.
- 2.4.5. Sebagai pedoman sebelum batas tertinggi pembuangan yang diizinkan ditentukan, dianggap ada risiko, apabila pembuangan radionuklida ke dalam saluran pembuangan umum melebihi konsentrasi yang diizinkan untuk air minum.
- 2.4.6. Pembuangan cairan radioaktif ke lingkungan harus selalu diukur sebelum menuju ke saluran umum, sehingga apabila terdapat kenaikan bahaya radiasi, tindakan keselamatan dapat diambil dan prosedur pembuangan dapat diperbaiki.

- 2.4.7. Bahan-bahan yang diambil sebagai cuplikan untuk diukur aktivitasnya meliputi endapan dan lumpur dalam instalasi pengolahan air buangan, hasil panen (yang tadinya diairi dengan air buangan atau telah menggunakan lumpur buangan sebagai sarana untuk mengembalikan kondisi tanah) dan endapan, ikan, ganggang yang terdapat dekat titik curah (outfall) apabila saluran pembuangan langsung ke saluran air. Tingkat radiasi eksterna di sekitar tempat kontrol aliran pembuangan dan tempat lain, di mana endapan dapat terkumpul harus dimonitor secara berkala khususnya sebelum pekerjaan perbaikan dan perawatan dilakukan. Selang waktu pengambilan cuplikan bergantung pada jumlah dan tingkat aktivitas yang dibuang.
- 2.4.8. Pembuangan limbah ke dalam saluran air harus dapat menjamin bahwa selama dilakukan perawatan terhadap saluran yang berada di luar instalasi tidak perlu adanya proteksi radiasi, kecuali memenuhi ketentuan khusus yang ditetapkan oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir.
- 2.4.9. Karena pada umumnya limbah cair yang beraktivitas tinggi yang berasal dari pemanfaat zat radioaktif volumenya kecil dan sering kali dapat ditangani dengan cara lain, maka pembuangan dan pengenceran limbah tersebut ke dalam saluran tidak dianjurkan (lihat no. 3.1.3. dan Bab 4 dan 5).
- 2.5. Batas yang diizinkan untuk penguburan dalam tanah oleh setiap pemanfaat zat radioaktif; penggunaan sistem pembuangan limbah perkotaan dan industri
- 2.5.1. Lokasi penguburan limbah harus dipilih secara cermat untuk mencegah terjadinya kontaminasi terhadap sumber air melalui pelindian limbah yang dikubur. Juga harus ada jaminan bahwa lokasi tersebut tetap tidak akan diganggu untuk jangka waktu yang lama, jangka waktu yang sebenarnya ditentukan oleh waktu paro zat radioaktif yang terkubur.
- 2.5.2. Penguburan zat radioaktif memerlukan izin dari Instansi Yang Berwenang. Dalam hal tertentu pemanfaat zat radioaktif diperkenankan untuk mengubur limbah radioaktif beraktivitas rendah, sesuai dengan ketentuan dalam Bab III. Batas yang diizinkan untuk pembuangan semacam ini harus ditentukan dengan cara perhitungan atau percobaan.
- 2.5.3. Di daerah yang penduduknya padat pemanfaat zat radioaktif tidak diizinkan mengubur limbah radioaktif, karena ada kemungkinan pemilikan lokasi dapat berpindah tangan atau kuburan limbah radioaktif terbongkar secara tidak sengaja. Tetapi apabila pemanfaat dapat menjamin dalam keadaan apapun bahwa zat radioaktif tidak menimbulkan bahaya radiasi eksterna dan interna, maka Badan Pengawas Tenaga Nuklir dapat mempertimbangkan pemberian izin penguburan limbah radioaktif.

2.5.4. Pembuangan limbah radioaktif melalui sistem pembuangan limbah kota dan sistem pembuangan limbah industri tanpa izin khusus dari Badan Pengawas Tenaga Nuklir tidak diperkenankan. Pemilihan lokasi dan cara penguburannya secara terinci, lihat Bab 4.

2.6. Batas yang diizinkan untuk insinerasi

2.6.1. Penggunaan metoda insinerasi bagi pengolahan limbah radioaktif padat hanya dapat dilakukan secara terbatas.

2.6.2. Izin insinerasi limbah radioaktif hanya akan diberikan setelah dipertimbangkan secara cermat tentang sifat limbah radioaktif, jenis atau tipe insinerator dan keadaan lingkungan tempat insinerasi. Ketentuan ini dibahas lebih lanjut pada Bab 5.

BAB 3

PENGELOLAAN LIMBAH RADIOAKTIF OLEH PEMANFAAT

3.1. U m u m

- 3.1.1. Zat radioaktif yang digunakan oleh para pemanfaat pada umumnya kuantitasnya kecil, dan biasanya berwaktu paro-pendek. Karena itu limbah yang dihasilkan tidak begitu berbahaya dan dapat ditangani dengan mudah. Masalah yang dihadapi dalam mengelola limbah dapat diperkecil dengan mengurangi jumlah zat radioaktif yang digunakan hingga sekecil mungkin, dengan menciptakan disiplin kerja yang ketat dan dengan menggunakan alat-alat yang mudah didekontaminasi.
- 3.1.2. Dalam praktek terdapat sejumlah besar limbah cair dihasilkan oleh para pemanfaat, misalnya oleh laboratorium di Universitas, yang mengandung zat radioaktif dengan konsentrasi di bawah nilai batas yang diizinkan yang langsung dapat dibuang ke saluran pembuangan. Limbah radioaktif beraktivitas rendah dapat diencerkan sehingga mencapai nilai batas yang diizinkan untuk dibuang.
- 3.1.3. Limbah cair yang beraktivitas tinggi dibiarkan meluruh dalam waktu tertentu sebelum dibuang ke saluran. Dalam praktek hal ini dilakukan untuk limbah radioaktif yang waktu-paronya kurang dari 30 hari.
- 3.1.4. Limbah cair yang tak dapat dibuang ke saluran, walaupun telah dibiarkan meluruh, harus dikumpulkan terpisah dan ditangani dengan cara lain (lihat Bab 4 dan 5).
- 3.1.5. Untuk limbah padat permasalahannya lain. Pada umumnya tingkat kontaminasinya sukar diukur dan oleh karena itu benda-benda yang terkontaminasi dengan tingkat kontaminasi rendah seringkali dianggap sebagai benda yang radioaktif.
- 3.1.6. Limbah padat yang hanya mengandung zat radioaktif dengan waktu-paro pendek dapat disimpan dan dibiarkan meluruh sehingga mencapai nilai batas yang diizinkan untuk dibuang dengan cara biasa.
- 3.1.7. Limbah yang tidak dapat dibuang dengan cara seperti tersebut di atas harus disimpan dan diatur pembuangannya dengan cara lain (lihat Bab 4 dan 5).
- 3.1.8. Limbah udara beraktivitas rendah dalam keadaan tertentu dapat dibuang langsung ke udara bebas tanpa menimbulkan bahaya. Untuk yang beraktivitas tinggi, sebelum dibuang ke udara harus dibersihkan melalui

filter atau scrubber dan kadang-kadang digunakan juga bahan penyerap gas radioaktif.

3.2. Prosedur pengumpulan limbah radioaktif

3.2.1. U m u m

3.2.1.1. Semua tempat penampungan limbah radioaktif harus diberi tanda yang jelas.

Pada umumnya penggolongan limbah radioaktif disesuaikan dengan cara pembuangan atau penyimpanan, dan disediakan wadah yang tersendiri untuk setiap cara yang akan digunakan. Bergantung kepada persyaratan instalasi, satu atau lebih kategori tersebut di bawah ini dapat berguna untuk mengklasifikasikan limbah berdasarkan :

- a. fasa, yaitu padat, cair dan gas
- b. tinggi rendahnya tingkat radiasi gamma
- c- tinggi rendahnya aktivitas
- d. panjang pendeknya waktu-paro
- e. sifat dapat dit)akar atau tidak

Untuk mudahnya tanda pengenal digunakan dengan memberikan warna dan kata-kata.

3.2.1.2. Wadah yang memakai penahan radiasi bila perlu digunakan.

3.2.1.3. Kuantitas limbah radioaktif yang dibuang ke sistem pembuangan saluran, atau yang dikubur harus dicatat dan catatan tersebut harus disimpan. Hal ini penting khususnya untuk zat radioaktif berwaktu-paro panjang. Untuk keperluan tersebut perlu disimpan catatan mengenai perkiraan jumlah zat radioaktif yang disimpan dalam berbagai tempat penampungan, terutama hal ini diperlukan untuk zat radioaktif yang aktivitasnya tinggi atau waktu paronya panjang. Setiap tempat penampungan limbah radioaktif harus diberi tanda atau kartu yang menunjukkan isinya.

3.2.2. Pengumpulan dan pemisahan limbah cair

3.2.2.1. Limbah cair harus dikelompokkan sesuai dengan tingkat dan jenis aktivitasnya, cara pembuangannya ditentukan oleh faktor-faktor tersebut.

3.2.2.2. Wadah khusus yang cukup besar untuk menampung volume limbah yang diduga akan terjadi, harus disediakan dan siap untuk dipakai ditempat yang telah ditentukan. Untuk memudahkan penanganan selanjutnya, adalah sangat praktis bila limbah cair dikelompokkan menurut tingkat aktivitasnya dan komposisi kimianya.

Cara yang terbaik untuk menangani limbah yang hanya mengandung zat radioaktif dengan waktu paro pendek adalah dengan mengumpulkan

limbah tersebut secara terpisah, sebab dengan cara menyimpan dalam waktu tertentu akan sangat memudahkan masalah yang dihadapi pada waktu pembuangan. Wadah untuk limbah cair harus ditempatkan dalam baki atau lebih baik dibungkus dengan pembungkus luar yang dilapis dengan bahan penyerap yang cukup banyak, misalnya “vermiculite” untuk mencegah menyebarnya kontaminasi bila terjadi kecelakaan yang menyebabkan pecahnya wadah.

3.2.2.3. Limbah radioaktif cair konsentrasi tinggi

Limbah cair konsentrasi tinggi yang berasal dari laboratorium pada umumnya terdiri atas larutan zat radioaktif dengan volume terbatas dan hasil akhir suatu eksperimen yang tidak digunakan. Limbah ini harus disimpan dalam wadah yang dipilih sesuai dengan sifat larutan limbah tersebut. Pada umumnya digunakan wadah dari plastik untuk keperluan ini, tetapi bila larutan mengandung pelarut organik harus digunakan wadah dari stainless steel.

Tidak dibenarkan menggunakan wadah yang terbuat dari gelas dan dianjurkan hanya menggunakan wadah yang dibuat dari bahan yang tidak mudah pecah. Wadah harus disimpan di tempat yang tertutup yang dilengkapi dengan penahan radiasi yang sesuai dengan sifat radiasi radionuklida yang disimpan di dalamnya. Zat radioaktif yang terdapat dalam larutan asam nitrat atau larutan pengoksidasi lainnya yang mungkin juga mengandung zat-zat organik yang tidak stabil terhadap panas, dan larutan-larutan yang mengandung aktivitas alfa lebih dari 5 mCi atau aktivitas beta lebih dari 50 mCi harus selalu disimpan dalam tabung yang mempunyai tutup berlubang. Catatan mengenai isi wadah harus selalu disimpan.

3.2.2.4. Limbah radioaktif cair konsentrasi rendah

Limbah radioaktif cair konsentrasi rendah berasal dari sisa larutan zat radioaktif yang telah diencerkan, air cucian alat-alat laboratorium (misalnya gelas beker, botol), limbah yang berasal dari hasil samping suatu eksperimen (misalnya ekskreta dari binatang), air cucian pakaian terkontaminasi atau air bekas pembersih daerah terkontaminasi.

3.2.2.5. Limbah radioaktif cair konsentrasi rendah volumenya mungkin dapat berbeda cukup besar bergantung pada sifat dan penggunaan zat radioaktif, Beberapa pekerjaan menghasilkan limbah cair kurang dari 20 liter per minggu, sedang pekerjaan yang lain dapat menghasilkan sampai beberapa meter kubik per minggu. Apabila jumlah volume relatif kecil yaitu kurang dari 50 liter per hari, mungkin cairan tersebut cukup dikumpulkan dalam wadah khusus.

- 3.2.2.6. Plastik dan stainless steel adalah bahan yang cocok untuk wadah sebab tidak mudah pecah, walaupun demikian untuk wadah kecil dapat digunakan gelas dan keramik asal digunakan dengan hati-hati. Beberapa wadah yang diletakkan di atas baki yang besar dapat ditempatkan langsung di bawah bak cuci yang dihubungkan dengan pipa fleksibel atau lainnya. Pipa tersebut masuk ke dalam wadah yang menghindari terjadinya percikan. Apabila wadah telah penuh atau hampir penuh diganti dengan yang kosong sesuai dengan kebutuhan. Wadah yang penuh dimonitor dan dikumpulkan sesuai dengan komposisi limbah untuk selanjutnya diolah atau diangkut dan dibuang sesuai dengan ketentuan yang berlaku.
- 3.2.2.7. Sistem tangki penampung diperlukan bila volume limbah radioaktif cair konsentrasi rendah cukup besar atau dihasilkan secara terus menerus dan memerlukan pemantauan sebelum pembuangan lebih lanjut. Bak pencuci khusus dihubungkan langsung ke tangki penampung yang berada di luar daerah kerja. Tangki biasanya dibuat dari baja atau stainless steel, bergantung pada tingkat korosi dari cairan limbah. Dapat juga limbah dinetralkan terlebih dahulu sebelum dimasukkan ke dalam tangki. Pengalaman telah menunjukkan bahwa tangki yang dibuat dari baja lunak (mild steel) dilapis dengan karet atau plastik adalah sangat praktis.
- 3.2.2.8. Saluran limbah cair dari beberapa laboratorium dapat dihubungkan ke sebuah tangki. Pipa plastik atau stainless steel, besi tuang atau baja memenuhi syarat untuk digunakan sebagai alat penghubung dari bak cuci dengan tangki penampung, bergantung pada sifat kimia atau tangki korosi dari limbah cair. Tangki harus dilengkapi dengan alat pengaduk, sehingga memungkinkan diperoleh contoh yang memenuhi syarat untuk dianalisis. Tangki diberi keran untuk memungkinkan pembuangan ke saluran (apabila konsentrasinya berada di bawah Nilai Batas Yang Diizinkan) atau memungkinkan untuk dipompa ke mobil tangki guna diangkut ke instalasi pengolahan limbah. Tingkat radiasi dari sistem pipa dan tangki harus dimonitor secara teratur.
- 3.2.3. Pengumpulan dan pengelompokkan limbah padat
- 3.2.3.1. Limbah padat perlu dikelompokkan pada waktu pengumpulan sesuai dengan proses pengolahan dan penanganan selanjutnya. Kantong yang digunakan untuk mengumpulkan limbah padat harus ditempatkan dalam wadah untuk mencegah robek dan penyebaran kontaminasi, misalnya pada waktu pembersihan lantai. Sangat praktis jika digunakan kotak limbah yang tutupnya dapat dibuka dengan kaki dan di bagian dalam dilapisi dengan kantong kertas atau plastik mudah diganti. Untuk menghindari terjadinya kontaminasi bila tempat limbah tersebut berisi limbah yang berdebu waktu membuka tutupnya dengan kaki harus

dilakukan dengan hati-hati. Kantong harus diikat dengan selotip sebelum diangkat dari dalam wadah.

3.2.3.2. Limbah padat yang dapat dibakar dalam insinerator

Bahan yang dapat dibakar seperti kain dan kertas dikumpulkan dalam wadah yang kedap air atau kantong plastik yang tebal. Dalam wadah tersebut tidak boleh dimasukkan sejumlah besar bahan yang mengandung polivinil klorida yang akan menimbulkan gas yang bersifat asam yang merupakan penyebab utama timbulnya korosi pada komponen insinerator yang dibuat dari baja.

3.2.3.3. Limbah padat yang dapat dimampatkan

Limbah padat yang akan dimanfaatkan dapat dikumpulkan dalam kantong kertas kedap air atau kantong plastik. Bahan-bahan yang mengandung banyak air harus dipisahkan.

3.2.3.4. Limbah padat yang dapat busuk

Limbah padat yang dapat busuk dikumpulkan dalam kantong polietilin. Bila gudang yang diperlengkapi dengan sistem pendingin tidak ada, di dalam kantong perlu diisi bahan-bahan seperti vermiculit atau tanah diatomaceous untuk menyerap cairan yang terjadi. Dapat juga dengan cara memberi larutan formaldehide, kapur atau hipoklorida. Sedikit larutan formalin yang encer mampu menunda pembusukan, sedang yang pekat mampu mengawetkan bangkai binatang kecil hingga jangka waktu sekitar satu tahun.

3.2.3.5. Limbah padat lain

Kelompok limbah padat seperti alat gelas yang pecah, potongan logam, dan endapan dari percobaan kimia disarankan agar ditangani secara khusus. Limbah padat, seperti peralatan laboratorium dan linoleum yang terkontaminasi dapat dikelompokkan untuk disimpan atau diangkut. Melapisi dengan cara mengecat atau menyemprot sebaiknya jangan dilakukan, kecuali apabila aktivitas permukaan itu sungguh melekat dengan kuat. Dibungkus dengan lembaran plastik biasa sudah cukup baik.

3.3. Limbah udara

3.3.1. Lemari asap khusus dan sistem pembuangan udara harus digunakan pada pekerjaan yang menimbulkan kontaminasi udara cukup berarti. Pemanfaatan zat radioaktif pada umumnya tidak memerlukan pembuangan udara yang dimurnikan. Akan tetapi sistem ventilasi didesain sedemikian rupa, sehingga kontaminasi tidak dapat menyebar ke

bagian lain dari gedung dan lubang udara ditempatkan pada tempat yang memenuhi syarat. Karena itu perlengkapan harus diusahakan untuk menyingkirkan zat radioaktif kecuali apabila dapat dibuktikan bahwa tidak akan menimbulkan bahaya radiasi.

- 3.3.2. Cara yang digunakan untuk menampung limbah gas, termasuk penggunaan filter karbon, absorber kimia dan perangkap gas akan ditentukan kemudian*). Perlu ditekankan bahwa desain dan instalasi dari sistem pembuangan dan pembersih udara harus dilakukan oleh seorang ahli dalam bidang itu kecuali untuk tipe yang paling sederhana.
- 3.3.3. Dalam hal kebakaran risiko terlepasnya zat radioaktif dari filter selalu ada. Oleh karena itu perlu dipilih jenis filter yang tepat dan pengawasan terhadap pekerjaan yang dilakukan dalam lemari asap.
- 3.3.4. Alat pembersih udara harus diperiksa secara teratur. Apabila filter rusak atau tingkat radiasinya mendekati batas yang telah ditentukan maka filter harus diganti secara hati-hati. Untuk mencegah terlepasnya zat radioaktif dari filter, maka filter tersebut harus diperlakukan dan dibungkus secara hati-hati misalnya dibungkus dengan plastik poliethilen. Filter yang sangat aktif harus dipisahkan dan dimampatkan hanya di bawah kondisi yang terkontrol.

3.4. Pemindahan dan pengosongan tempat limbah radioaktif

- 3.4.1. Bila tempat limbah radioaktif penuh atau radiasinya mendekati batas radiasi yang diizinkan, maka wadah tersebut harus dipindahkan dari tempat kerja ke daerah penyimpanan khusus.
- 3.4.2. Wadah yang digunakan untuk mengumpulkan limbah aktif harus memenuhi syarat pengangkutan limbah aktif sehingga tidak mengakibatkan tersebarnya zat radioaktif tersebut. Dalam beberapa hal limbahnya saja atau akan lebih baik apabila berikut tempatnya dipindahkan ke wadah khusus yang digunakan untuk pengangkutan.
- 3.4.3. Perhatian khusus harus diberikan untuk membatasi penyebaran zat radioaktif.
Pakaian pelindung, termasuk respirator mungkin diperlukan untuk perlindungan personil, ventilasi dan kemungkinan adanya penyebaran di tempat pemindahan perlu mendapat perhatian. Untuk menghindari berbagai masalah pengangkutan limbah dalam bentuk cair yang tidak terlalu besar jumlahnya dapat diatasi dengan menyerap cairan tersebut dengan vermikulit.
- 3.4.4. Pengalaman menunjukkan bahwa kontaminasi mudah terjadi apabila limbah cair dituangkan dari satu wadah ke wadah lain. Untuk

menghindari ini, harus digunakan pompa khusus atau alat vakum dan dilakukan dengan hati-hati untuk menjamin agar semua cairan tidak ada yang tumpah ke luar wadah.

3.5. Cara membuang saluran pembuangan

- 3.5.1. Limbah radioaktif cair yang dibuang ke saluran pembuangan harus mudah larut dan mudah tersebar dalam air. Harus diperhatikan kemungkinan terjadinya perubahan harga pH, karena pengenceran dan faktor kimia fisika lain yang dapat mengakibatkan terjadinya endapan atau penguapan.
- 3.5.2. Apabila kadar tertinggi yang diizinkan atau batas tertinggi yang boleh dibuang harian atau mingguan ke suatu saluran pembuangan telah ditetapkan (lihat No. 2.4.) didasarkan dapat memperkirakan perubahan konsentrasi yang terjadi dalam saluran pembuangan untuk menentukan cara pembuangan yang harus dilaksanakan.
- 3.5.3. Apabila perubahan kadar tertinggi yang diizinkan telah ditetapkan perlu ditentukan pengaturan yang praktis untuk menjamin agar perubahan konsentrasi tidak melampaui batas tertinggi yang ditetapkan. Kecepatan arus air yang berubah-ubah dalam saluran perlu diperhatikan.
- 3.5.4. Apabila ternyata bahwa dengan cara yang sederhana perubahan konsentrasi dapat melampaui kadar tertinggi yang diizinkan, misalnya dengan cara membuang langsung ke bak pencuci, atau membuang langsung kotoran pasien yang sedang dirawat dengan zat radioaktif, maka pembuangan harus diatur secara bertahap sedikit demi sedikit untuk menjaga agar kecepatan pembuangan relatif tetap rendah.

BAB 4

PROSEDUR PENGOLAHAN LIMBAH RADIOAKTIF YANG BIASANYA TIDAK DIBUANG SENDIRI OLEH PARA PEMANFAAT ZAT RADIOAKTIF

4.1. U m u m

Bab ini membahas pengolahan limbah untuk pengelolaan secara kolektif dimana setiap pemanfaat zat radioaktif tidak direkomendasikan untuk menangani sendiri. Pengelolaan dapat dilaksanakan secara lebih menguntungkan apabila dilakukan di instalasi pengolahan limbah yang melayani beberapa kelompok pemanfaat.

4.2. Pengolahan limbah padat

4.2.1. Pemampatan

Volume dari berbagai jenis limbah padat dapat dikurangi dengan mudah secara pemampatan dengan alat pemampat yang ada di pasaran dengan modifikasi seperlunya. Cara pengurangan volume tersebut berbeda-beda terutama bergantung pada jenis limbah; nasehat dalam hal ini dapat diminta langsung pada pabrik pembuat alat pemampat tersebut. Pengurangan volume biasanya berkisar menjadi antara separo atau sepersepuluhnya dari volume mula. Pada umumnya, menaikkan tekanan lebih dari 10 kg/cm² tidak banyak berguna atau tidak berguna sama sekali. Limbah dapat dimampatkan di dalam wadah yang cocok (biasanya drum metal) atau dimampatkan lalu dibungkus. Tindak pencegahan khusus harus dilakukan agar tidak terjadi bahaya kontaminasi dari debu sewaktu limbah diletakkan dalam alat press dan pada waktu pemampatan.

4.2.2. Insinerasi

Oleh karena sebagian besar dari limbah padat dapat dibakar, seringkali insinerasi merupakan cara yang mudah untuk mengurangi volume. Cara ini mempunyai keuntungan yaitu untuk merubah bentuk limbah menjadi bentuk yang tidak menarik bagi binatang tertentu (tikus, kelinci, dan sebagainya) dan dalam hal tertentu merupakan cara yang baik untuk mengolah limbah binatang percobaan yang terkontaminasi dan limbah berbau busuk lainnya.

4.2.2.1. Setiap pengolahan secara insinerasi harus selalu dianalisa dengan seksama. Hal-hal yang perlu mendapat perhatian adalah : pembakaran tidak sempurna, keluarnya zat radioaktif dari cerobong dan selanjutnya mengalami pengenceran, jatuhnya zat radioaktif yang keluar dari cerobong

pelapisan zat radioaktif pada dinding cerobong, tertinggalnya zat radioaktif dalam abu dan penanganan lebih lanjut dari abu tersebut.

- 4.2.2.2. Pembakaran limbah radioaktif dalam tabung terbuka menyebabkan penyebaran kontaminasi dari debu halus dan gas dalam udara. Hampir semua jenis limbah yang dapat dibakar diolah secara insinerasi, tetapi kemungkinan terjadinya korosi pada peralatan perlu diperhatikan. Perlu diingat bahwa selama insinerasi keracunan kimia hasil pembakaran limbah terkontaminasi, seperti teflon, mungkin merupakan bahaya terbesar.
- 4.2.2.3. Syarat utama mengoperasikan insinerator, yang mengolah limbah radioaktif dalam jumlah besar dapat diringkas sebagai berikut :
 - a. Pembakaran sempurna, memerlukan penggunaan peralatan pembakaran dengan gas atau minyak bakar.
 - b. Dekontaminasi yang efisien dari gas yang keluar dari cerobong.
 - c. Pengaturan penanganan abu tidak menimbulkan debu radioaktif.
 - d. Pemantauan dan pemeliharaan yang sesuai (pengukuran secara periodik harus dilakukan terhadap kumpulan radioaktivitas di daerah sekitar lingkungan insinerator).
Harus diperhatikan dan diawasi bahwa filter dan pembersih udara selalu dalam keadaan baik.
- 4.2.2.4. Bahaya kontaminasi dapat dikurangi sekecil mungkin dengan pengaturan agar insinerator selalu bekerja di bawah tekanan atmosfer. Terbentuknya aerosol dikurangi dengan pengeringan pendahuluan dari limbah yang akan dibakar.
- 4.2.2.5. Batas diizinkan pada insinerasi.
Sangat sukar menentukan batas aktivitas tertinggi yang diizinkan untuk insinerasi (lihat no. 2.6). Sebagian besar bergantung pada toksisitas isotop yang ada, efisiensi pembersihan gas, penyebaran gas dari cerobong dan fasilitas penanganan abu.
- 4.2.2.6. Faktor dekontaminasi.
Perbandingan antara aktivitas awal yang ada dengan yang dibuang ke lingkungan melalui cerobong bergantung pada zat radioisotop yang ada, suhu pembakaran dan efisiensi dari sistem pembersihan udara. Untuk semua zat radioaktif kecuali yang bersifat mudah menguap, seperti jodium radioaktif, perbandingan rata-rata insinerator berkisar dipakai antara 10^4 - 10^5 . Apabila air sebagai sistem pembersih, perbandingan antara radiojodium dan zat radioaktif yang mudah menguap lainnya dapat diperbaiki dengan menjaga harga pH dari cairan pembersih pada pH 9,0 - 10,0. Tetapi hal ini sulit karena terhentuknya sejumlah besar carbon dioksida. Akibatnya, zat radioaktif yang mudah menguap tidak boleh

diinsinerasikan, kecuali dapat dibuktikan bahwa tidak akan menimbulkan bahaya atas dasar asumsi yang konservatif.

4.2.2.7. Pengurangan volume.

Besar pengurangan volume dengan insinerasi bergantung pada jenis limbah yang ditangani dan derajat pemampatannya. Dalam hal kertas dan bahan yang serupa, yang telah dibungkus kuat-kuat, pengurangan volume dapat mencapai 80 : 1. Dengan limbah binatang percobaan dan limbah yang lebih padat pengurangan volume mungkin mencapai 30 : 1. Untuk limbah yang telah diolah dengan cairan pembersih dan filter memungkinkan penurunan bandingan dari 80 : 1 menjadi 50 : 1.

4.2.2.8. Bahan konstruksi.

Disarankan menggunakan bahan tahan api yang konvensional untuk dipakai sebagai pelapis tungku api. Hal ini menghasilkan dan mempertahankan suhu tinggi yang diperlukan untuk membakar limbah tertentu seperti binatang percobaan. Hanya dalam hal-hal tertentu diperlukan metal yang tahan korosi. Filter untuk gas buangan harus tahan api.

4.2.2.9. Penanganan abu.

Abu harus dikumpulkan dalam air kemudian dipompa sebagai lumpur ke dalam sistem pengolahan limbah cair atau dipindahkan ke dalam drum yang dilengkapi dengan filter kantong yang dapat mengembang. Pada umumnya abu dapat ditangani seperti limbah padat, perlu diperhatikan agar cara membasahinya tidak menimbulkan debu radioaktif.

4.3 Pengolahan limbah cair

4.3.1 Penguapan dengan evaporator

Penguapan dengan evaporator merupakan cara yang sangat baik untuk mengurangi volume limbah cair.

Secara singkat keuntungan utamanya adalah sebagai berikut :

- a. Distilatnya pada umumnya cukup memenuhi syarat untuk dibuang ke saluran tertutup.
- b. Hampir setiap limbah cair, baik yang berbentuk ion maupun tidak, dapat dikerjakan secara evaporasi asalkan jenis evaporator yang dipilih tepat.
- c. Faktor dekontaminasi pada umumnya diperoleh lebih tinggi daripada cara biasa lainnya.
- d. Konsentrat yang disimpan atau yang akhirnya dibuang, volumenya kecil.

- 4.3.1.1. Perlu diingat bahwa penguapan dengan evaporasi mempunyai kekurangan tertentu. Kesukaran akan timbul apabila terdapat zat radioaktif yang mudah menguap, seperti Ruthenium tetroksida dan jodium. Apabila larutan yang komposisinya tidak diketahui, maka faktor dekontaminasi yang diperoleh sangat bergantung pada kecepatan mendidih dan pemasukannya. Pemasukan larutan yang menimbulkan buih dan larutan yang menimbulkan kerak dapat menimbulkan masalah yang serius. Pengawasan terhadap korosi harus diperhatikan dan penguraian atau sama sekali tidak memasukkan bahan seperti ammonium nitrat yang dapat menyebabkan ledakan yang dahsyat. Penguraian komponen limbah karena panas perlu juga diperhatikan.
- 4.3.1.2. Pembentukan buih dapat dikontrol dalam batas tertentu dengan penambahan zat anti pembentukan buih; silikon adalah sangat efektif untuk maksud ini. Pemanfaatan evaporator tipe film dapat menolong mengatasi kesukaran karena pembentukan buih. Prosedur yang efektif lainnya termasuk penggunaan lempeng pengarah (baffle), alat pengontrol harga pH dan pengontrol batas permukaan cairan.
- 4.3.1.3. Dalam desain suatu evaporator, yang pertama yang harus diperhatikan adalah keandalannya dan mudah pemeliharaannya.
- 4.3.1.4. Pada umumnya logam tahan korosi seperti baja tahan karat dipakai sebagai bahan struktur kecuali yang untuk limbah yang mengandung klorida tinggi.
- 4.3.1.5. Penguapan dengan evaporator biasanya merupakan cara yang mahal untuk pemekatan, karena menyangkut penanaman modal yang relatif tinggi. Oleh karena itu proses ini lebih menarik untuk pemanfaat yang besar atau instalasi pengolahan dari pada untuk pemanfaat kecil. Biaya operasinya sebagian besar bergantung pada harga bahan bakar. Biaya ini dapat dikurangi dengan menggunakan evaporator tipe-up-tekan (forced vapor compression) atau evaporator efek ganda (multiple-effect evaporation).
- 4.3.1.6. Penanganan konsentrat akhir. Kecuali apabila evaporator didesain khusus, biasanya dalam praktek evaporasi dihentikan sebelum kristalisasi. Hal ini untuk memberikan kesempatan untuk mengambil residu dari penguapan tanpa mengalami kesukaran. Pengalaman menunjukkan bahwa nilai rata-rata yang sesuai untuk zat padat pada konsentrat akhir kurang lebih 60%. Di atas angka 60% konsentrat menjadi sukar untuk ditangani. Tetapi dalam beberapa hal, penguapan dengan evaporator dilaksanakan sampai kering.
- 4.3.1.7. Konsentrat basah dapat disimpan atau diserap dengan vermiculit atau tanah liat kemudian ditangani sebagai limbah padat. Cara lain dapat

dicampur dengan semen dan dibiarkan mengeras. Prosedur yang disebutkan terakhir pada umumnya menghasilkan beton berkualitas rendah karena mudah dilindi. Untuk mengatasi hal tersebut perlu dilapis dengan beton berkualitas baik atau dimasukkan dalam wadah yang sesuai untuk mengurangi pelindian zat radioaktif. Pencampuran konsentrat ke dalam bitumen menghasilkan campuran yang mempunyai sifat lebih baik dari segi pelindung.

4.3.1.8. Volume dari konsentrat bergantung pada jumlah zat padat di dalam limbah cair yang dimasukkan dalam evaporator dan proses yang dipergunakan. Untuk proses yang konvensional, perbandingan volume antara limbah cair yang dimasukkan dalam evaporator dan konsentrat yang terjadi antara 10 : 1 sampai 50 : 1. Instalasi penguapan harus didesain secara seksama dan dilengkapi dengan instrumen yang diperlukan.

4.3.2. Penukar ion

Penukar ion sering kali dipakai untuk dekontaminasi limbah radioaktif cair. Keuntungannya ialah mudah dioperasikan dan mudah disesuaikan dengan pengontrolan secara otomatis atau jarak jauh. Tetapi beberapa faktor penting harus diperhatikan bila diinginkan memperoleh efisiensi tinggi. Tidak hanya zat radioaktif harus dipisahkan secara efisien, tetapi harus juga dikonsentrasikan ke dalam volume sekecil mungkin. Dalam menggunakan penukar ion perlu diperhatikan beberapa hal sebagai berikut :

- a. Apabila cara ini dipakai secara langsung, jumlah suspensi padat di dalam umpan harus sangat rendah untuk mencegah penyumbatan dari kolom resin. Kalau jumlah suspensi padat adalah tinggi mungkin diperlukan pengolahan pendahuluan.
- b. Untuk memperpanjang umur penukar ion dari lapisan, dijaga agar kandungan zat bukan radioaktif yang larut dalam aliran harus serendah mungkin.
- c. Konsentrasi dari zat radioaktif dalam bentuk non ion dari koloid harus sangat rendah.
- d. Kemungkinan terdapat gangguan dari senyawa kompleks.

4.3.2.1. Beberapa tindakan untuk pengontrolan dari faktor-faktor tersebut mungkin diusahakan dalam beberapa cara sebagai berikut :

- a. Suspensi padat dapat dikontrol dengan cara pemisahan berbagai aliran limbah. Air pendingin dari suatu proses yang mengandung suspensi padat rendah dapat dialirkan langsung ke dalam penukar ion sedangkan limbah dari laboratorium diperlukan penyaringan pendahuluan. (Pemisahan juga menjamin bahwa volume memerlukan pengolahan pendahuluan sekecil mungkin).

- b. Apabila pemisahan aliran sukar dilaksanakan, semua limbah dapat disaring atau diolah secara koagulasi kimia untuk memisahkan baik suspensi padat maupun beberapa radionuklida.
- c. Penyaringan mekanis pada pengolahan kimia mungkin menghasilkan pemisahan sebagian dari radiokoloid dan radionuklida non ion. Resin penukar ion tertentu dapat digunakan untuk pemisahan pendahuluan dari ion non radioaktif yang mengganggu sebelum limbah tersebut dialirkan melalui penukar ion utama.
- d. Kadar zat padat yang larut dapat dijaga serendah mungkin dengan menggunakan air yang didemineralisasikan di instalasi yang memanfaatkan zat radioaktif tersebut.

4.3.2.2. Faktor konsentrasi.

Dari kepustakaan diketahui bahwa derajat konsentrasi yang diperoleh dengan penukar ion menunjukkan hasil yang sangat berbeda. Untuk itu diperlukan penelitian dalam laboratorium pada skala kecil guna menunjukkan kelayakan metoda dan mengembangkan prosedur pemrosesan serta menentukan persyaratan alat yang digunakan.

4.3.2.3. Limbah yang diolah dengan penukar ion tanpa pengolahan kimia pendahuluan, efisiensinya bergantung pada kandungan ion dalam limbah. Apabila kandungan ini tinggi penukar ion akan cepat jenuh. Regenerasi penukar ion menghasilkan sejumlah besar limbah cair radioaktif dan hal ini menimbulkan masalah pembuangan.

4.3.2.4. Apabila penukar ion (biasanya anorganik) digunakan sesudah pengolahan kimia dan tidak diregenerasi, faktor konsentrasi hanya bergantung pada jumlah aliran yang melaluinya. Hal ini sangat dipengaruhi oleh afinitet relatif kation yang ada dalam limbah. Dari afinitet relatif ini dapat ditentukan kondisi penukar ion disesuaikan dengan kation yang ada dalam limbah.

4.3.3. Pengolahan secara biologi

Proses biologi mungkin merupakan metoda pengolahan pendahuluan cukup memuaskan untuk pemisahan bahan organik dari limbah radioaktif. Limbah tidak boleh terlalu asam atau basa dan bebas dari bahan yang beracun dalam konsentrasi yang cukup untuk menghalangi pertumbuhan organisme yang diperlukan untuk proses tersebut. Faktor dekontaminasi untuk zat radioaktif adalah kecil, berbeda-beda dari tidak dapat diandalkan. Keuntungan utama pengolahan secara biologi adalah mengurangi kandungan bahan organik limbah tersebut sedemikian, sehingga dapat diolah dengan metoda lain secara memuaskan, misalnya dengan pengolahan secara kimia atau penukar ion.

4.3.4. P e m a d a t a n

Limbah radioaktif cair beraktivitas sedang dan tinggi dalam volume kecil, yang terkumpul di suatu instalasi dari waktu ke waktu, pada umumnya tidak boleh dicampur dengan limbah lain. Untuk penyimpanan atau pengangkutan yang aman, lebih menguntungkan apabila limbah tersebut dipadatkan. Hal ini dapat dilakukan dengan mencampur dengan semen, dengan cara absorpsi pada vermiculit atau tanah liat (misalnya dengan montmorillonite atau kaolinite).

4.3.5. Pengolahan secara kimia

Tujuan pengolahan secara kimia adalah untuk mengkonsentrasikan radionuklida menjadi endapan yang tidak larut dalam volume kecil dan mudah dipisahkan.

4.3.5.1. Meskipun pengolahan limbah radioaktif cair secara kimia pada umumnya tidak menghasilkan faktor dekontaminasi tinggi, namun untuk volume yang besar merupakan penyelesaian yang praktis dan ekonomis. Beberapa pengolahan secara kimia mungkin diperlukan sebelum evaporasi, hal ini juga merupakan proses yang efektif untuk dekontaminasi.

Pengolahan secara kimia juga menguntungkan karena dapat memisahkan suspensi padat sebelum pengolahan dengan penukar ion.

4.3.5.2. Metoda ini memerlukan pengalaman yang cukup dan tidak bergantung pada jenis limbah cair yang akan diolah. Kelemahan metoda ini ialah menghasilkan endapan kimia yang memerlukan penanganan lebih lanjut. Keuntungan metoda ini relatif murah.

4.3.5.3. Banyak senyawa pengendap dan flokulan dapat digunakan untuk pengolahan ini meliputi oksalat, sulfat, karbonat, fosfat, tawas, soda, asam penyamak, garam fero dan feri, silika aktif, fero-sianida-nikel dan fero-sianida-tembaga serta tanah liat misalnya bentonite. Tingkat aktivitas cairan utama seringkali dapat diturunkan tingkat aktivitasnya sampai cukup aman untuk disalurkan ke saluran tertutup atau lingkungan. Apabila terdapat campuran hasil fisi, maka makin besar pH cairan yang diolah akan makin besar efisiensi pemisahannya. Untuk ini dapat digunakan metoda pengendapan fosfat, yang terbukti menarik karena dapat dilaksanakan sampai pH 11.5. Garam feri dapat pula digunakan pada daerah pH ini.

4.3.5.4. Zat pembantu koagulasi

Perlu diperhatikan untuk mendapatkan cairan yang dibuang dari tangki pengendap dengan jumlah gumpalan yang minimum. Untuk itu

diperlukan pengontrolan yang tetap dari kecepatan aliran dalam tangki pengendap dan pemilihan koagulan yang tepat, apabila terdapat kesukaran mungkin diperlukan penggunaan zat pembantu koagulasi tersebut dapat diperoleh dengan mudah seperti polimer sintetis dengan berat molekul tinggi yang terkenal sebagai poli-elektrolit dalam banyak hal cukup efisien.

4.3.5.5. Pengolahan secara tidak kontinyu (batch).

Apabila volume yang akan diolah kecil, pengolahan kimia secara tidak kontinyu dapat dilakukan. Limbah padat dikumpulkan dalam tangki sentral dan dipindahkan ke tangki lain yang mempunyai dasar kerucut dilengkapi dengan alat pengaduk.

Ke dalam tangki tersebut ditambahkan zat kimia dan diaduk dengan cepat dalam waktu singkat (1 sampai 10 menit), kemudian diaduk perlahan-lahan dalam waktu yang lebih lama (10 sampai 60 menit).

Apabila tangki tersebut kecil pengadukan dapat dilakukan secara manual menggunakan batangan pengaduk yang sesuai. Setelah pengadukan selesai dan diperoleh gumpalan yang baik, kemudian dibiarkan mengendap ke dasar tangki (proses pengendapan ini mungkin memerlukan waktu beberapa jam). Setelah itu endapan dikeluarkan untuk diproses lebih lanjut dengan cara yang cocok, cairan yang dibuang harus dimonitor dan apabila radioaktivitasnya cukup rendah, maka langsung boleh dibuang.

Apabila radioaktivitasnya masih cukup tinggi perlu diolah ulang dengan menggunakan zat kimia yang berbeda, diproses dengan penukar ion atau evaporasi.

4.3.5.6. Penanganan endapan.

Endapan yang diperoleh dari pengolahan secara kimia dapat disaring, di sentrifugasi, diserap dengan vermiculit atau bahan sejenis, dicampur dengan semen. Kemudian ditangani sebagai limbah padat.

BAB 5

METODA PENYIMPANAN DAN PENGUNGKUNGAN LINGKUNGAN DARI LIMBAH RADIOAKTIF

5.1. U m u m

Penyimpanan limbah radioaktif dalam instalasi yang didesain khusus diperlukan mengingat hal-hal sebagai berikut :

- a. Untuk menyimpan sementara sebelum diolah di dalam instalasi pengolahan radioaktif atau dibuang di tempat pembuangan.
- b. Agar zat radioaktif berwaktu-paro pendek dapat meluruh, sehingga dapat dibuang ke lingkungan atau untuk menurunkan aktivitasnya sebelum diolah.
- c. Untuk memungkinkan pengaturan kecepatan pembuangan dalam lingkungan.
- d. Untuk memungkinkan pemantauan zat radioaktif yang mempunyai tingkat bahaya yang belum diketahui.
- e. Agar mampu menyimpan dalam jangka waktu panjang, umpamanya beberapa tahun atau untuk selamanya.

5.1.2. Jenis instalasi penyimpanan yang diperlukan bergantung pada macam limbah, cara pembungkusan atau penampungan, jenis radiasi penyinaran yang dipancarkan, serta alasan penyimpanannya.

5.1.3. Instalasi penyimpanan dapat ditempatkan di atas tanah, tetapi lazimnya ditempatkan sebagian atau seluruhnya di bawah tanah. Kontaminasi air tanah harus dicegah. Limbah radioaktif yang disimpan harus didaftar, dan dimonitor dengan cara yang memadai untuk mendeteksi adanya perembesan zat radioaktif ke lingkungan. Jika terjadi kebocoran, harus diambil tindakan untuk mengatasi keadaan dengan cara modifikasi peralatan atau metoda kerja.

5.1.4. Instalasi penyimpanan harus ditempatkan jauh dari daerah kerja biasa, dengan diberi pemagaran dan tanda-tanda dan hanya orang yang berwenang dapat memasuki tempat itu. Daerah itu harus diberi atap dan diberi lantai yang kedap air dan jalan yang mudah didekontaminasi. Di ruangan yang tertutup harus dilengkapi dengan sistem ventilasi yang memenuhi syarat untuk mencegah timbulnya bahaya yang disebabkan karena menghirup udara yang mengandung debu atau uap. Apabila kecelakaan atau penumpahan zat radioaktif, udara dan semua permukaan ruangan harus dimonitor.

5.1.5. Mereka yang bekerja di instalasi tersebut harus memakai pakaian untuk proteksi.

5.2. Penyimpanan sementara

5.2.1. Limbah radioaktif cair dapat disimpan dalam wadah kecil sebagai penyimpanan sementara. Cairan yang bersifat korosif harus disimpan dalam wadah yang tahan korosi.

5.2.2. Pemanfaat harus menyadari kemungkinan pembentukan gas dari penguraian bahan organik dan bahwa pembentukan endapan kadang-kadang mengubah medan radiasi di luar wadah.

5.2.3. Wadah penyimpanan sementara tersebut harus diatur sedemikian rupa, untuk mencegah tersebarnya kontaminasi oleh binatang dan untuk menghindarkan akibat yang membahayakan atau bau yang tidak enak yang terjadi karena penguraian zat organik.

5.2.4. Untuk memudahkan penanganan selanjutnya, maka limbah radioaktif harus dapat dipisah-pisah selama dalam penyimpanan sementara, umpamanya pemisahan untuk pengepakan (baling), insinerasi, penguburan dan sebagainya.

Perlu pula dipisahkan barang-barang yang terkontaminasi oleh pemancar alfa, atau pemisahan zat radioaktif berwaktu paro panjang dari zat radioaktif yang memancarkan sinar gamma dan beta yang berwaktu paro pendek. Limbah radioaktif harus disimpan sedemikian rupa, sehingga penyinaran radiasi pada para pekerja serendah-rendahnya, yaitu dengan cara menyimpan limbah yang aktivitasnya lebih tinggi tempat yang tidak mudah dicapai, atau menghalangi dengan limbah yang aktivitasnya lebih rendah. Harus dijaga agar alat pengangkut maupun alat penanganan tidak terganggu karenanya.

5.3. Penyimpanan jangka panjang

5.3.1. Dalam mengatur penyimpanan limbah radioaktif untuk jangka panjang, diperlukan penelitian yang seksama untuk mempelajari kemungkinan timbulnya bahaya. Penyimpanan limbah radioaktif jangka panjang dapat menimbulkan bahaya kebakaran, korosi wadah dan penyebaran kontaminasi oleh binatang.

5.3.2. Sifat geologi tertentu dapat dimanfaatkan untuk penyimpanan jangka panjang.

Umpamanya, suatu kemungkinan untuk menyimpan limbah radioaktif dalam tambang garam bawah tanah yang sudah tidak terpakai lagi, karena tempat tersebut selalu kering, sehingga memenuhi syarat untuk penyimpanan jangka panjang. Tambang batu bara umumnya tidak

memenuhi syarat, karena terdapat aliran air. Bekas tambang mineral yang kering dapat digunakan. Diusahakan agar volume limbah yang akan disimpan sekecil mungkin.

- 5.3.3. Dalam hal penyimpanan limbah di bawah tanah tidak dapat dilakukan, maka dapat dilakukan dalam parit pada permukaan tanah. Parit semacam ini harus didesain sedemikian rupa, sehingga dapat mencegah tersebarnya radioaktivitas.

Untuk menjaga agar parit itu kering, maka permukaannya harus dilapisi dan ditutup dengan beton. Dinding penyekat dapat dibuat guna memisahkan-misahkan bermacam ragam limbah dan juga untuk mengurangi tingkat radiasinya.

- 5.3.4. Untuk penyimpanan zat radioaktif seperti sumber terbungkus secara sendiri-sendiri dapat digunakan tabung baja atau beton yang dibuat dalam blok beton yang ditanam dalam tanah dan dilengkapi dengan tutup beton.

- 5.3.5. Bangunan khusus untuk menyimpan zat radioaktif untuk jangka panjang dapat dibangun di atas tanah. Bangunan ini mahal dan umumnya hanya dipakai apabila direncanakan untuk mengolah kembali limbah tersebut secara mudah.

- 5.3.6. Jika dipandang perlu menyimpan sejumlah besar limbah radioaktif cair (umpamanya agar meluruh) limbah yang bersifat netral dapat disimpan dalam tangki dari beton atau tangki dari baja lunak. Limbah yang bersifat asam atau korosif memerlukan tangki dari baja tahan karat atau tangki yang dilapisi karet atau plastik.

Tangki harus dilengkapi dengan penunjuk permukaan cairan yang dapat dipercaya. Tangki cadangan harus tersedia untuk menghadapi kemungkinan terjadinya kerusakan dan pemeriksaan kebocoran dari tangki utama. Metoda pengumpulan cuplikan harus termasuk penggunaan alat pengaduk, dan hendaknya berhati-hati agar tidak terjadi penyumbatan pipa oleh endapan.

- 5.4. Pengungkungan lingkungan dari pembuangan limbah radioaktif padat dan cair dalam tanah

- 5.4.1. Dalam beberapa hal, pembuangan limbah radioaktif dalam tanah dapat dipandang sebagai suatu cara penyimpanan jangka panjang. Kemungkinan untuk mengambil kembali selalu ada, tetapi hal tersebut di atas tidak perlu, apabila tempat dan cara penguburan dipilih secara seksama.

- 5.4.2. Limbah dapat dirubah sedemikian rupa, agar sesuai dengan kondisi lingkungannya misalnya dengan cara mencampur aspal atau beton.

- 5.4.3. Sebelum tempat pembuangan limbah digunakan, pemanfaat diwajibkan melakukan penilaian terhadap pengaruh radioisotop di lingkungan dan dinyatakan memenuhi syarat oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir. Khususnya pemeriksaan geologi dan hidrologi perlu dilakukan dengan seksama untuk menjamin tidak terjadi kontaminasi sumber air. Percobaan secara laboratorium dan lapangan harus dilakukan untuk menentukan kecepatan pelindian zat radioaktif. Tata guna lingkungan baik untuk pertanian maupun lainnya perlu diteliti ditetapkan perkiraan penyinaran radiasi jangka panjang terhadap manusia secara konservatif.
- 5.4.4. Sesuai dengan hasil penilaian yang telah dilakukan harus dibuat nilai batas sementara pembuangan limbah dalam tanah. Tetapi mengingat setiap penilaian bersifat perkiraan, maka survai dan pemantauan radioaktivitas lingkungan harus dilakukan dengan seksama, agar dapat diambil langkah yang tepat setiap saat untuk mencegah bahaya yang tidak terduga.
- 5.4.5. Dalam praktek setiap pembuangan ke dalam tanah, secara besar-besaran menjadi mahal terutama di daerah yang kemungkinan pencemaran air tanah sangat besar. Hal ini disebabkan karena pemeriksaan yang teliti mengenai gerakan air tanah memerlukan banyak pengeboran dan analisa harus dilakukan dalam jangka panjang dengan memperhatikan perubahan musim dan perubahan lainnya. Misalnya aliran air tanah pada musim kemarau dan hujan.
- 5.5. Pembuangan ke laut akan ditentukan sendiri
- 5.6. Pemantauan sehubungan dengan pembuangan limbah radioaktif ke lingkungan

Kemungkinan bahaya pada manusia yang ditimbulkan dari setiap pambuangan limbah radioaktif ke lingkungan harus dievaluasi oleh Badan Pengawas Tenaga Nuklir agar dapat ditentukan perlunya diambil langkah pengukuran kadar zat radioaktif secara rutin, tingkat radiasi lingkungan dan kadar serta banyaknya zat radioaktif yang dibuang.

Tujuan pemantauan terutama untuk mengetahui apakah petunjuk pelaksanaan ataupun nilai batas penyinaran ditaati. Tujuan tersebut tidak akan tercapai dengan memuaskan, apabila pemantauan diserahkan sepenuhnya pada pihak yang membuang limbah.

L A M P I R A N
MACAM-MACAM LIMBAH SESUAI DENGAN PEMANFAATAN
ZAT RADIOAKTIF

Isotop	Umur paro	Pemanfaatan Utama	Aktivitas	Keterangan
^{227}Ac	22 tahun	Sebagai sumber actinium 227-Berilium	1-100 mC	Tidak menimbulkan limbah radioaktif, kecuali apabila sumber patah atau hilang
^{124}Sb	60 hari	a. sebagai sumber netron antimon 124-Berilium b. sebagai perunut	102-103 Ci micro-mili-curi	Tidak menimbulkan limbah radioaktif, kecuali apabila sumber patah atau hilang Kurang berbahaya
^{140}Ba	12,8 hari	Perunut dalam industri baja	10-50 mCi	Tinggal berbahaya
^{80}Br dan ^{82}Br	1,5 tahun 36 jam	a. untuk diagnostik b. perunut dalam industri yaitu studi retensi dalam tangki	$\sim 10 \mu\text{Ci}$ $\sim 100 \text{mCi}$	Keluar bersama urine Cair dan padat
^{137}Cs	30 tahun	Sumber terbungkus dipakai untuk terapi dan radiografi	1 mCi	Tidak menimbulkan limbah radioaktif, kecuali apabila sumber patah atau hilang
^{14}C	5760 tahun	a. Sebagai senyawa bertanda sebanyak kira-kira 200 macam b. Sebagai perunut dalam biologi	$\sim 10 \mu\text{Ci}$	Macam limbah beraneka ragam bergantung pada mcam percobaan

Isotop	Umur paro	Pemanfaatan Utama	Aktivitas	Keterangan
^{51}Cr	27,8 hari	Untuk keperluan kedokteran	10 μCi setiap pasien	Keluar dari tubuh secara perlahan-lahan
^{60}Co	5,27 tahun	a. Sebagai sumber terbungkus untuk radiografi, kedokteran atau untuk penggunaan umum lainnya b. Sebagai sumber radiasi dalam industri dalam bentuk sumber terbungkus	sampai 50 Ci sampai megacuri	Sangat kecil penggunaannya sebagai perunut dalam industri, seluruhnya digunakan sebagai sumber terbungkus
^{198}Au	2,7 hari	terapi : a. dalam bentuk koloid b. dalam bentuk “butir” sumber terbungkus dalam platina	logam koloid sampai 150 mCi setiap dosis Butir dalam jumlah milicuri	Sebagian besar tertahan dalam tubuh pasien Sering tertinggal dalam tubuh pasien tetapi dapat berupa limbah padat
^3H	12,26 tahun	Berbagai penggunaan dalam industri, perunut dalam penelitian biologi, dsb	Sangat bervariasi	Sebagian besar berupa limbah cair
^{131}I	8,04 hari	Diagnostik dan terapi	1-50 μCi	Kurang lebih 75% dikeluarkan melalui urine
^{132}I	2,26 jam	Diagnostik dan terapi a. hipertiroid	5-10 mCi	Seperti pada ^{131}I tetapi umur paro pendek, mengurangi bahaya yang ditimbulkan

Isotop	Umur paro	Pemanfaatan Utama	Aktivitas	Keterangan
^{192}Ir	74,4 hari	b. kanker kelenjar a. radiografi industri b. perunut pasir untuk hidrologi	100-150 mCi 1-100 Ci setiap sumber	Sumber terbungkus
^{59}Fe	45 hari	Diagnostik dan penelitian	~10 μCi setiap pasien	Sebagian dikeluarkan dari tubuh
^{197}Hg dan ^{203}Hg	65 jam 47 hari	Untuk diagnostik	~10 μCi setiap pasien	Sebagian dikeluarkan dari tubuh
^{32}P	14,2 hari	a. untuk diagnostik b. terapi penyakit darah c. penelitian di bidang pertanian, termasuk percobaan di lapangan	sampai 300 μCi 5-10 mCi setiap dosis sampai 100 Ci	Dikeluarkan melalui urine Limbah berbentuk cair dan padat tergantung dan berharga, apabila terjadi limbah hanya sedikit
^{226}Ra	1620 tahun	a. kedokteran b. dalam industri sebagai sumber berbentuk lempeng tipis terdapat dalam tabung elektronik dan alat pemutus dan penangkal arus petir	dalam jumlah mCi dalam jumlah mikrocuri	Sumber terbungkus mahal dan berharga, apabila terjadi limbah hanya sedikit Limbah padat

Isotop	Umur paro	Pemanfaatan Utama	Aktivitas	Keterangan
^{46}Sc	84 hari	c. pembuatan senyawa berluminesensi Perunut pasir dalam penelitian hidrologi	sampai kira-kira 50 mCi/kg beberapa Ci setiap percobaan	Terutama limbah padat Macam limbah tergantung pada jenis percobaan
^{22}Na	2,58 tahun	Diagnostik	dalam jumlah μCi	Sebagian besar dikeluarkan dari tubuh
^{24}Na	15 jam	a. perunut dalam diagnostik b. perunut dalam industri misalnya pemeriksaan kebocoran	Mikro sampai mCi	Limbah berbentuk cair atau padat apabila digunakan untuk diagnostik sebagian besar dikeluarkan dari tubuh
^{89}Sr	51 hari	Perunut dalam bidang penelitian pertanian skala besar	100-100 mCi setiap percobaan	Limbah berbentuk cair dan padat
^{90}Sr	28 tahun	Sebagai sumber terbungkus dalam bidang : a. industri b. kedokteran dan lain-lain	1 mCi - 1 Ci	Sebagai sumber terbungkus tidak banyak menimbulkan masalah limbah
^{35}S	87,2 hari	Percobaan dalam bidang pertanian (sebagai insektisida dan fungisida)	Sampai Ci	Macam limbah bergantung pada jenis percobaan

