

PENGELOLAAN PRADISPOSAL LIMBAH PABRIK KAOS LAMPU PETROMAKS YANG MENGANDUNG TORIUM

Aisyah

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif – BATAN
Kawasan Puspiptek, Tangerang Selatan 15310
aisyah@batan.go.id

ABSTRAK

PENGELOLAAN PRADISPOSAL LIMBAH PABRIK KAOS LAMPU PETROMAKS yang MENGANDUNG TORIUM. Fabrikasi kaos lampu petromaks akan menimbulkan limbah radioaktif yang mengandung torium. Torium merupakan radionuklida berumur paro panjang dan dalam peluruhannya menghasilkan gas thoron yang berbahaya bagi manusia, oleh karena itu pengelolaan pradisposal limbah ini harus dilakukan dengan benar. Kondisioning merupakan salah satu tahapan pradisposal yang dipilih untuk pengolahan limbah yang mengandung torium. Konsep kondisioning dilakukan dengan mempertimbangkan fakta bahwa sampai dengan saat ini belum ada kriteria yang spesifik dalam pradisposal limbah yang mengandung torium, sehingga kondisioning harus dilakukan dengan prinsip kemudahan membongkar kembali kemasan limbah tersebut di masa mendatang. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif telah melakukan kondisioning limbah yang mengandung torium dengan cara memasukkan limbah ke dalam drum polietilena yang selanjutnya drum polietilena yang telah berisi limbah yang mengandung torium dimasukkan kedalam drum baja karbon. Rongga diantara drum polietilena dan drum baja karbon diisi dengan beton dan dibagian atas drum polietilena diberi arang aktif kemudian ditutup dan disimpan dalam tempat penyimpanan sementara. Perlu diperhatikan *degradasi container* limbah pada penyimpanan sementara. Berdasarkan hasil pemantauan dosis radiasi eksterna dan interna serta pemantauan lingkungan terkait dengan pengelolaan pradisposal limbah yang mengandung torium ini, dapat disimpulkan bahwa keselamatan pekerja terhadap bahaya radiasi masih dalam batas yang selamat.

Kata kunci: Pradisposal, kaos lampu petromaks, torium, kondisioning.

ABSTRACT

PRADISPOSAL MANAGEMENT OF LANTERN MANTLE FABRICATION WASTE CONTAINING THORIUM. Fabrication of lantern mantle will generate radioactive waste containing thorium. Thorium has half long lived radionuclides and the decay will generate thoron gas that is harmful to humans, therefore thorium wastes must be managed properly. Conditioning is one of the stages pradisposal selected for processing waste containing thorium. The concept of conditioning is done by considering the fact that until now there is no specific criteria in thorium waste management, so that conditioning should be done with the principle of ease of dismantling of packaging waste that has been conditioned in the future. Radioactive Waste Technology Center has been doing conditioning thorium waste by entering the waste into a polyethylene drum and then polyethylene drums containing thorium wastes inserted into the carbon steel drums. Space between the drum polyethylene and carbon steel drums filled with concrete and in the top of polyethylene drums were given activated charcoal and then closed and stored in a temporary storage. It should be noted degradation of waste containers in storage temporarily. Based on the results of monitoring of external and internal radiation doses and environmental monitoring associated with the pradisposal management of waste containing thorium, it can be concluded that the safety of workers to the radiation risk was still within safe limits.

Key words: Pradisposal, lantern mantle, thorium, conditioning.

PENDAHULUAN

Masalah pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh pembuangan limbah industri secara sembarangan banyak dijumpai di negeri ini. Pada umumnya untuk menekan biaya produksi, industri sering membuang limbahnya langsung ke lingkungan. Hal inilah yang mengakibatkan pencemaran lingkungan yang membahayakan kesehatan masyarakat. Terkait dengan hal ini pernah terjadi pencemaran lingkungan di disekitar pabrik kaos lampu petromaks. Dalam pembuatan kaos lampu petromaks akan ditimbulkan limbah radioaktif yang berupa sisa potongan kaos lampu. Sisa potongan kaos lampu ini oleh pihak pabrik direduksi volumenya dengan membakarnya dalam tempat pembakaran yang sederhana. Abu sisa pembakaran kemudian disimpan dalam tanah. Penyimpanan yang kurang sempurna mengakibatkan kerusakan kemasan limbah abu bercampur dengan tanah sehingga terjadi kontaminasi pada tanah disekitar penyimpanan limbah. Oleh pihak pabrik kaos lampu, akhirnya dilakukan pengambilan limbah abu beserta tanah yang terkontaminasi limbah torium, kemudian limbah ini dikirim ke Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR) untuk dilakukan pengelolaan agar tidak menimbulkan dampak radiologis bagi masyarakat dan lingkungan.

Pengelolaan limbah radioaktif meliputi 2 tahapan yaitu pradisposal dan disposal. Pradisposal limbah radioaktif merupakan tahapan pengelolaan limbah radioaktif mulai dari awal penimbunan limbah sampai penerimaan akhir limbah pada lokasi disposal^[1]. Dengan didasarkan pada Undang-Undang Ketenaganukliran maka Pusat Teknologi Limbah Radioaktif merupakan satu-satunya institusi yang memiliki kewajiban melakukan kegiatan pradisposal limbah radioaktif yang ada di seluruh wilayah Indonesia.

Seperti diketahui bahwa limbah yang berupa campuran abu dan tanah yang ditimbulkan dari pabrik kaos lampu memiliki kandungan radionuklida yang dominan adalah torium. Torium merupakan zat radioaktif yang memancarkan radiasi sinar alfa dan gama. Salah satu anak luruh torium yang cukup berbahaya adalah ²²⁰Rn yaitu gas thoron yang dapat masuk kedalam tubuh melalui pernafasan dan dapat larut kedalam darah dan tersebar ke seluruh tubuh^[2,3]. Mengingat waktu paro torium yang cukup panjang, maka diperkirakan efek radioaktifnya baru muncul diwaktu mendatang yaitu merusak gen dan sel tubuh. Oleh karena itu, harus dilakukan pengelolaan limbah yang sesuai dengan standar keselamatan.

Makalah ini membahas mengenai pengelolaan pradisposal limbah radioaktif dan pradisposal limbah dari pabrik kaos lampu petromaks yang mengandung torium dengan mempertimbangkan

perkembangan pengelolaan pradisposal dimasa mendatang.

Makalah ini dibuat pada Tahun 2011 di Bidang Teknologi Pengolahan Limbah Dekontaminasi Dekomisioning-Pusat Teknologi Limbah Radioaktif.

PENGELOLAAN PRADISPOSAL LIMBAH RADIOAKTIF

Limbah radioaktif merupakan salah satu isu pokok ditengah masyarakat yang tidak setuju dengan keberadaan suatu instalasi nuklir. Hal ini merupakan cerminan dari persepsi masyarakat bahwa limbah radioaktif itu seperti limbah industri lainnya, yaitu dengan jumlah yang sangat besar dan dibuang begitu saja ke lingkungan sehingga akan menimbulkan rasa tidak nyaman pada penduduk sekitarnya dan merusak lingkungan hidup. Disamping itu adanya persepsi yang perlu diluruskan bahwa radiasi yang ditimbulkan dari limbah radioaktif itu sangat berbahaya bagi kesehatan masyarakat. Oleh karena itu diperlukan perhatian dan sosialisasi pada masyarakat mengenai pengelolaan limbah radioaktif yang sebenarnya.

Menurut Undang-Undang No.10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran pada pasal 22 ayat 1 disebutkan bahwa pengelolaan limbah radioaktif dilaksanakan untuk mencegah timbulnya bahaya radiasi terhadap pekerja, anggota masyarakat dan lingkungan hidup^[4]. Oleh karena itu semua kegiatan yang menimbulkan limbah radioaktif perlu dikelola, diatur, dan diawasi secara benar, agar masyarakat memperoleh manfaat dan persepsi yang benar.

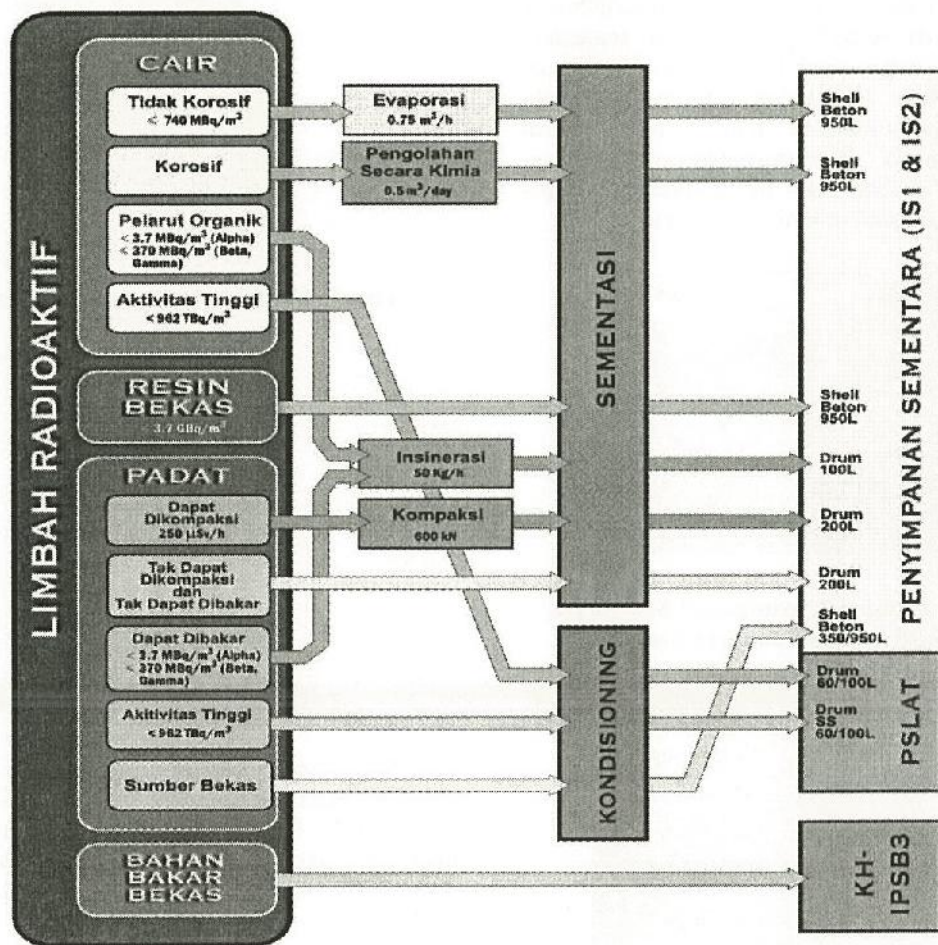
Pradisposal limbah radioaktif meliputi seluruh tahapan atau kegiatan dalam pengelolaan limbah radioaktif mulai dari awal penimbunan limbah sampai penerimaan akhir pada lokasi disposal. Kegiatan pradisposal meliputi pengolahan awal, pengolahan, kondisioning, dekomisioning, penyimpanan sementara dan kegiatan dalam persiapan pengangkutan dan kegiatan lain yang terkait seperti karakterisasi limbah awal, bentuk limbah atau kemasan limbah yang cocok pada tahapan proses sampai penyerahan paket limbah dalam lokasi disposal. Kegiatan pradisposal akan menghasilkan paket limbah yang dapat ditangani, diangkut dan disimpan sementara untuk kemudian didisposal dengan aman^[1,5,6].

Di Indonesia limbah radioaktif ditimbulkan dari kegiatan kedokteran nuklir, aplikasi teknik nuklir di bidang industri, pengoperasian reaktor nuklir untuk produksi radioisotop dan penelitian produksi bahan bakar nuklir, produksi radioisotop dan penelitian bidang nuklir. Limbah radioaktif harus dikelola untuk mencegah timbulnya bahaya radiasi terhadap pekerja anggota masyarakat dan lingkungan hidup.

Dalam undang-Undang No.10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran, pasal 23 ayat (1) menyebutkan bahwa pengelolaan limbah radioaktif dilaksanakan oleh Badan Pelaksana, dalam hal ini Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) sedangkan dalam pasal 24 ayat (1) menyebutkan bahwa penghasil limbah radioaktif tingkat rendah dan tingkat sedang wajib mengumpulkan, mengelompokkan atau menyimpan sementara limbah tersebut sebelum diserahkan kepada BATAN. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif merupakan salah satu institusi di BATAN yang memiliki tugas pokok mengelola limbah radioaktif yang ada di seluruh wilayah Indonesia. Berdasarkan kedua pasal ini jelas bahwa pihak penimbul limbah (dalam hal ini industri/pabrik) wajib menyimpan sementara limbah yang dihasilkannya dengan memenuhi standar keselamatan sebelum dikirim ke PTLR-BATAN. Penyimpanan sementara limbah radioaktif ini dilakukan dengan seijin dan selalu dalam pengawasan Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN).

Untuk melakukan kegiatan predisposal limbah radioaktif harus memiliki fasilitas pengelolaan limbah radioaktif, sumber daya manusia yang punya kompetensi dibidang pengolahan limbah radioaktif serta didasarkan pada landasan hukum yang berlaku. Persyaratan fasilitas untuk pengelolaan predisposal limbah radioaktif akan bervariasi tergantung pada volume dan karakteristik limbah, seperti sifat radionuklida, aktivitas dan komposisi kimia serta bentuk fisik dari limbah, dan resiko bahaya non radiologik.

Sesuai dengan amanat Undang-Undang, bahwa PTLR merupakan satu-satunya institusi yang memiliki tugas melakukan pengelolaan predisposal limbah radioaktif dari seluruh wilayah Indonesia, maka PTLR memiliki Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR) untuk mengolah limbah radioaktif padat, cair, semi cair dan sumber bekas. Pengelolaan predisposal limbah radioaktif yang dilakukan PTLR seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1^[7,8].



Gambar 1. Pengelolaan Predisposal Limbah Radioaktif di PTLR^[7,8]

Pada Gambar 1 terlihat bahwa limbah radioaktif cair diolah dengan cara evaporasi dan konsentrat hasil evaporasi diimobilisasi dalam shell beton 950 L dengan campuran semen. Bila limbah cair bersifat korosif maka limbah diolah secara kimia (*chemical treatment*) sebelum diimobilisasi. Limbah cair organik dan limbah padat terbakar direduksi volumenya dengan cara insenerasi. Limbah padat termampatkan proses reduksi volumenya dilakukan dengan cara kompaksi dan hasil kompaksi selanjutnya diimobilisasi dalam drum 200 L. Limbah padat tak terbakar dan tak termampatkan seperti misalnya sumber bekas pengolahannya dimasukkan secara langsung dengan cara imobilisasi dalam shell beton 350L/950L. Limbah yang telah diimobilisasi kemudian disimpan dalam tempat penyimpanan sementara limbah radioaktif. Pusat Teknologi limbah radioaktif memiliki tempat penyimpanan sementara untuk limbah radioaktif aktivitas rendah dan sedang seperti hasil imobilisasi limbah konsentrat evaporator dalam *shell* beton 950 liter maupun hasil imobilisasi limbah padat terkompaksi dalam drum 200 liter. Sedangkan untuk limbah sumber bekas dengan radiasi yang tinggi dilakukan penyimpanan sementara pada tempat penyimpanan sementara limbah radiasi tinggi yang berupa sumuran dengan kedalaman sekitar 6 meter dari permukaan tanah. Gambar 2 menunjukkan tempat penyimpanan sementara limbah aktivitas rendah dan sedang, sedangkan Gambar 3 menunjukkan tempat penyimpanan sementara limbah radiasi tinggi^[7,8].



Gambar 2. Tempat Penyimpanan Sementara Limbah Aktivitas Rendah dan Sedang^[7,8]



Gambar 3. Tempat Penyimpanan Sementara Limbah Radiasi Tinggi^[7,8]

KAOS LAMPU PETROMAKS

Torium mempunyai sifat khusus yaitu jika dibakar pada suhu tinggi akan memancarkan warna putih yang cerah. Dengan sifat ini maka torium digunakan sebagai bahan pelapis dalam pembuatan kaos lampu. Torium yang menempel pada kain kaos lampu petromaks akan memberikan pancaran sinar kuat pada saat lampu petromaks difungsikan^[9,10]. Di Indonesia kaos lampu petromaks diproduksi dengan cara merendam kain kaos lampu petromaks dalam larutan torium nitrat selama kurang lebih 1 jam. Perendaman lebih lanjut dilakukan dalam larutan amonia, yang dimaksudkan untuk memperoleh endapan torium hidroksida yang menempel pada kain kaos lampu petromaks. Kain kaos lampu yang telah mengandung torium hidroksida kemudian dipotong dan dibentuk sebagai kaos lampu petromaks^[9]. Gambar 4 menunjukkan contoh kaos lampu petromaks sedangkan Gambar 5 menunjukkan salah satu contoh lampu petromaks yang menggunakan 2 buah kaos lampu^[11,12].



Gambar 4. Kaos Lampu Petromaks^[11,12]



Gambar 5. Lampu Petromaks^[11,12]

Penggunaan torium pada kaos lampu dilakukan guna memperoleh pijar (nyala) seperti lampu listrik. Ketika kaos lampu dipasang pada lampu petromaks dan kemudian lampu dinyalakan, maka torium nitrat akan berubah menjadi torium oksida pada saat penyalaan awal. Untuk memperkuat penyalaan (*whiteness*) maka dalam fabrikasi kaos lampu ditambahkan cerium nitrat, sedangkan untuk memperkuat (mengeraskan) struktur kaos lampu maka ditambahkan berilium

nitrat^[13].

Torium yang digunakan dalam kaos lampu petromaks adalah torium alam (Th^{232}) yang diperoleh dari ekstraksi batuan torium. Dalam torium alam terdapat Th^{228} yang diasumsikan berada dalam kesetimbangan sekular, kemudian radionuklida anak luruh yang timbul secara spontan dengan berjalannya waktu. Batuan torium biasanya juga mengandung uranium alam. Dalam hal ini Th^{230} merupakan anggota dari seri uranium yang diperkirakan ada dalam kaos lampu^[14,15].

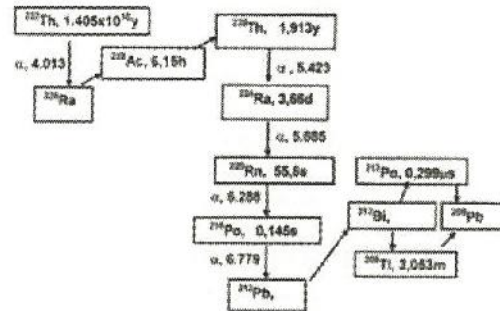
KARAKTERISTIK LIMBAH PABRIK KAOS LAMPU PETROMAKS

Dalam produksi kaos lampu petromaks akan ditimbulkan limbah yang berupa sisa potongan kain kaos lampu yang mengandung torium hidroksida. Untuk mereduksi limbah ini, pihak pabrik melakukan pembakaran sisa potongan kain kaos lampu hingga menjadi abu. Oleh pihak pabrik, abu hasil pembakaran kemudian disimpan sementara dalam area pabrik.

Penyimpanan sementara abu hasil pembakaran kaos lampu di tempat penimbun limbah dilakukan kurang memadai, sehingga limbah radioaktif torium ini sewaktu dikirim ke PTLR berupa campuran abu, tanah, dan bahan lain yang terdapat dalam permukaan tanah. Analisis limbah yang dilakukan dengan *Multi Channel Analyzer* menunjukkan bahwa limbah memiliki aktivitas total $0,028972 \text{ Ci.m}^{-3}$, dengan radionuklida ^{227}Th : $2,95 \times 10^{-5} \text{ Ci.m}^{-3}$, ^{228}Ac : $1,37 \times 10^{-4} \text{ Ci.m}^{-3}$, ^{228}Th : $6,54 \times 10^{-3} \text{ Ci.m}^{-3}$, dan ^{229}Th : $2,03 \times 10^{-4} \text{ Ci.m}^{-3}$. Limbah ini dikategorikan sebagai limbah pemancar alfa dengan kandungan radionuklida torium yang mempunyai umur paro panjang dan bersifat toksik, dan selanjutnya dalam makalah, limbah ini disebut dengan limbah torium.

Torium merupakan nuklida dengan beberapa isotop yang mempunyai nomor massa 212 - 236. Torium alam (^{232}Th) mempunyai waktu paro yang sangat panjang yaitu $1,405 \times 10^{10}$ tahun, sedangkan ^{228}Th mempunyai waktu paro 1,913 tahun^[16].

Limbah torium akan terus meluruh dengan menghasilkan beberapa anak luruh seperti pada skema yang ditunjukkan pada Gambar 6^[3,14]. Hasil luruhan torium yang cukup berbahaya adalah gas thoron (^{220}Rn) yang dimungkinkan dapat keluar dari kemasan limbah. Oleh karena itu diperlukan pengelolaan limbah yang baik agar aman bagi masyarakat dan lingkungan.



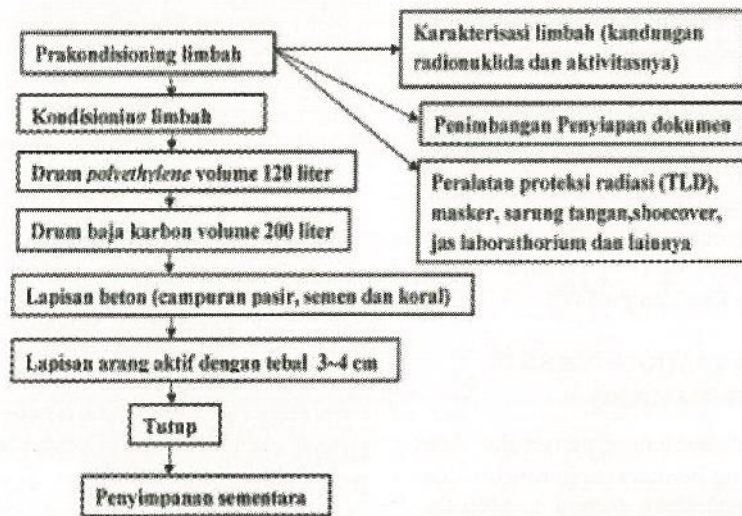
Gambar 6. Skema Peluruhan Radionuklida Torium^[3,14]

PENGELOLAAN PRADISPOSAL LIMBAH PABRIK KAOS LAMPU PETROMAKS

Limbah torium dari pabrik kaos lampu petromaks merupakan limbah radioaktif aktivitas rendah dan sedang tapi mengandung radionuklida berumur paro panjang yaitu torium. Limbah ini memerlukan pengelolaan yang baik agar selamat bagi masyarakat dan lingkungan. Sampai dengan saat ini PTLR telah melakukan kegiatan pengelolaan pradisposal limbah dari pabrik kaos lampu petromaks yang berupa campuran abu dan tanah yang mengandung torium yang berjumlah 208 buah drum. Pengolahan limbah dari pabrik kaos lampu petromaks yang merupakan tahapan penting dari kegiatan pradisposal dilakukan dengan metode kondisioning. Metode kondisioning ini dilakukan untukantisipasi teknologi reduksi volume limbah dimasa mendatang. Kondisioning yaitu suatu proses yang menghasilkan paket limbah yang cocok untuk keselamatan, penanganan, pengangkutan, penyimpanan sementara, dan disposal. Kondisioning termasuk didalamnya imobilisasi limbah, pewadahan limbah dalam kontainer.

Konsep kondisioning dilakukan dengan mempertimbangkan fakta bahwa sampai dengan saat ini belum ada kriteria yang spesifik dalam pengelolaan limbah torium. Oleh karena itu, sebaiknya mempertimbangkan ide *retrievability* dan *reversibility*, sehingga teknik kondisioning diupayakan tidak menyulitkan penanganan suatu saat nanti. Perlu dihindari juga pengolahan limbah dengan imobilisasi langsung dalam matriks tertentu karena hal ini belum tentu kompatibel dengan langkah pengolahan dimasa mendatang. Oleh karena itu kondisioning harus dilakukan dengan prinsip kemudahan membongkar kembali kemasan limbah yang telah terkondisioning tersebut di masa mendatang. Kondisioning limbah diperlukan sebelum disposal, hal ini dimaksudkan untuk mencegah lepasnya bahan radioaktif ke lingkungan dan untuk meminimalkan paparan radiasi.

Kondisioning limbah torium dari pabrik kaos lampu petromaks yang telah dilakukan di PTLR ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Skema Proses Pengelolaan Limbah Torium

Proses kondisioning diawali dengan proses prakondisioning yaitu dengan melakukan karakterisasi limbah seperti konsentrasi dan kandungan radionuklida dalam limbah, kemudian penimbangan limbah dan penyiapan dokumen limbah. Dilakukan juga penyiapan peralatan proteksi radiasi seperti Dosimeter Termoluminesensi (TLD), masker, sarung tangan, *shoecover* dan lainnya. Hal ini untuk memantau paparan radiasi yang diterima pekerja pada saat proses kondisioning limbah torium.

Proses kondisioning dilakukan dengan cara memasukkan limbah torium dalam drum *polietilena* volume 120 L, kemudian drum *polietilena* yang telah berisi limbah torium dimasukkan kedalam drum baja karbon volume 200 L. Rongga diantara drum polietilen dan drum baja karbon ditambahkan lapisan beton (campuran pasir, semen dan koral) dan dibagian atas drum *polietilena* diberi arang aktif dengan tebal sekitar 3~4 cm, kemudian drum volume 200 L baru ditutup. Arang aktif berfungsi untuk menyerap gas thoron yang timbul dari peluruhan radionuklida torium dalam limbah sehingga tidak terlepas ke lingkungan. Limbah pabrik kaos lampu yang mengandung torium yang telah terkondisioning biasa disebut dengan paket limbah torium, kemudian disimpan di tempat penyimpanan sementara. Gambar 8 menunjukkan drum *polietilena* volume 120 L sedangkan Gambar 9 menunjukkan paket limbah torium. Pengelolaan limbah torium dengan cara kondisioning seperti ini masih dimungkinkan dan mudah untuk ditindak lanjuti dengan proses lain jika ada kerusakan wadah atau jika ada teknik kondisioning lain.



Gambar 8. Drum Polietilen 120 L



Gambar 9. Paket Limbah Torium

PEMBAHASAN

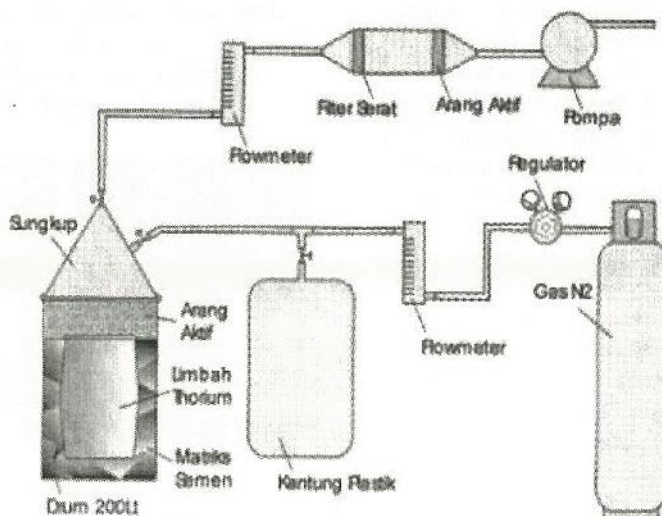
Dalam fabrikasi kaos lampu petromaks selain limbah padat yang berupa abu dari sisa pembakaran kaos lampu petromaks maka juga terdapat limbah cair yang ditimbulkan dari proses perendaman dan

pencucian pada fabrikasi kaos lampu. Dalam pabrik kaos lampu petromaks pengelolaan limbah torium cair ini dilakukan dengan penguapan secara alamiah dengan memanfaatkan sinar matahari yaitu dengan cara menampung limbah cair dalam kolam-kolam penampungan terbuka sehingga air akan teruapkan. Sisa penguapan berupa *sludge* dimasukkan dalam wadah drum dan disimpan sementara dalam pabrik. Pengelolaan pradisposal limbah *sludge* yang mengandung torium ini pada prinsipnya sama dengan limbah padat yang berupa campuran abu dan tanah yang mengandung torium yaitu melalui metode kondisioning.

Saat ini di tempat penyimpanan sementara limbah radioaktif PTLR telah tersimpan limbah kondisioning limbah dari pabrik kaos lampu petromaks yang mengandung torium. Dalam penyimpanan sementara, paket limbah torium (mengandung ^{232}Th dan ^{228}Th) akan terus meluruh dengan menghasilkan beberapa anak luruh diantaranya adalah gas thoron (^{220}Rn) yang cukup berbahaya yang dimungkinkan dapat keluar dari paket limbah^[3]. Menurut standar, batasan lepasan gas thoron ke lingkungan (E_{th}) : 84 Bq/24jam. Jadi jika laju lepasan gas thoron dari dalam paket limbah lebih besar dari 84 Bq/24 jam maka dikatakan terjadi kebocoran paket limbah^[17,18]. Oleh karena itu telah dilakukan penelitian terhadap kemungkinan terlepasnya gas thoron dari paket limbah torium dengan maksud mengevaluasi paket limbah torium yang telah dilakukan PTLR selama ini. Metoda evaluasi dilakukan dengan pengukuran gas thoron langsung pada paket limbah torium. Metoda evaluasi dilakukan dengan pengukuran gas thoron menggunakan rangkaian peralatan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 10^[17-19]. Rangkaian peralatan terdiri dari sungkup, yang dilengkapi

dengan filter selulose nitrat (filter serat), arang aktif, pompa, dan gas nitrogen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tidak terdeteksi adanya lepasan gas thoron dari paket limbah torium. Hal ini berarti limbah torium terkungkung cukup rapat dalam paket limbah sehingga sangat kecil terjadi lepasan gas thoron ke luar paket limbah. Namun demikian jika terjadi lepasan gas thoron dari dalam wadah drum *polietilena* maka gas thoron tersebut akan teradsorpsi oleh arang aktif yang telah ditempatkan pada bagian atas drum tersebut. Suatu saat arang aktif akan mengalami kejenuhan, oleh karena itu secara berkala arang aktif ini memerlukan penggantian.

Pusat Teknologi Limbah Radioaktif juga melakukan penelitian limbah campuran abu dan tanah yang mengandung torium dengan metode imobilisasi langsung dalam semen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kandungan limbah yang optimal adalah 20 % berat dengan densitas $1,7749 \text{ g/cm}^2$, kuat tekan 2 kN/cm^2 dan laju pelindihan $1 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2\text{hari}$ ^[20]. Torium merupakan radionuklida berumur paro sangat panjang (dalam orde 10^{10} tahun) sedangkan semen memiliki kekuatan hanya maksimal 300 tahun. Oleh karena itu imobilisasi limbah yang mengandung radionuklida umur panjang seperti torium akan lebih selamat menggunakan bahan matriks polimer. Polimer dapat bertahan dalam jangka waktu yang panjang. Namun demikian mengacu pada *trend* pengolahan limbah masa depan maka akan lebih tepat pengelolaan limbah campuran abu dan tanah yang mengandung torium ini dilakukan dengan proses kondisioning sehingga memudahkan membongkar kembali limbah untuk disesuaikan dengan *trend* pengolahan limbah masa depan.



Gambar 10. Rangkaian Peralatan Pengukuran Lepasn Gas Thoron^[19]

Pengelolaan limbah radioaktif yang berupa campuran abu dan tanah yang mengandung torium perlu diperhatikan faktor keselamatan pada saat melaksanakan kegiatan kondisioning. Untuk itu PTLR melakukan pemantauan personil/perkerja dan daerah kerja sejak awal hingga akhir kegiatan. Pemantauan dosis radiasi personil dilaksanakan dengan melakukan pemantauan dosis radiasi eksterna dan interna terhadap pekerja radiasi PTLR. Tujuan kegiatan ini adalah mengendalikan penerimaan dosis radiasi yang diterima pekerja agar tidak melampaui Nilai Batas Dosis (NBD) yang diperkenankan. Pemantauan dosis radiasi eksterna dilakukan menggunakan Dosimeter Termoluminesensi (TLD), sedangkan pemantauan dosis radiasi interna dilaksanakan secara *in vivo* dengan *Whole Body Counter* (WBC) dan *in vitro* dengan analisis urin. Pemantauan dosis radiasi secara umum dilakukan 3 bulan sekali. Berdasarkan hasil pemantauan dosis radiasi eksterna dan interna terkait dengan pengelolaan limbah campuran abu dan tanah yang mengandung torium, dilaporkan bahwa keselamatan pekerja terhadap bahaya radiasi masih dalam batas yang selamat (masih dibawah NBD yang diperkenankan)^[21].

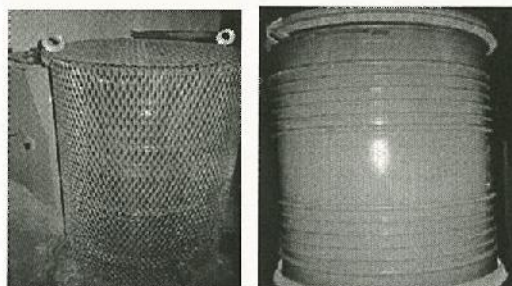
Selain pemantauan dosis personil maka dilakukan juga pemantauan lingkungan disekitar PTLR bahkan sampai radius 5 kilometer secara kontinyu. Tujuan umum pemantauan ini adalah untuk mendapatkan informasi tingkat paparan radiasi dan konsentrasi radionuklida, pola penyebaran dan akumulasi berbagai jenis radionuklida yang terlepas ke lingkungan dari kegiatan nuklir dimana kegiatan pengelolaan limbah termasuk didalamnya termasuk pemantauan radionuklida torium akibat adanya kegiatan pengelolaan limbah campuran abu dan tanah yang mengandung torium. Hasil pemantauan menunjukkan bahwa tidak terdeteksi adanya radionuklida buatan baik dari hasil fisi maupun aktivasi termasuk radionuklida torium yang berasal dari kegiatan pengelolaan limbah di PTLR^[22]. Oleh karena itu kegiatan nuklir yang dilakukan oleh BATAN pada umumnya dan PTLR yang mengelola limbah radioaktif berlangsung secara selamat sesuai standar keselamatan yang ditetapkan oleh BAPETEN dan *International Atomic Energy Agency* (IAEA).

Selain pemantauan lepasan gas thoron, maka selama paket limbah torium berada dalam tempat penyimpanan sementara, harus selalu dipertimbangkan ketahanan paket kondisioning termasuk tanda identitas yang harus tetap jelas selama periode penyimpanan atau lebih lama lagi. Hal lain yang harus diperhatikan adalah bahwa penyimpanan harus aman, khususnya yang berkaitan dengan radiasi, kontaminasi, resiko kebakaran, dan keselamatan fisik lainnya secara kontinyu dilakukan pengontrolan

Masalah utama yang dihadapi dalam penyimpanan sementara limbah radioaktif dengan umur paro panjang seperti limbah torium ini adalah terjadinya penurunan kemampuan wadah dalam mengungkung atau mengikat limbah. Penurunan (degradasi) wadah dalam mengungkung zat radioaktif dapat mengakibatkan terlepasnya zat radioaktif ke lingkungan. Terkait dengan hal ini maka dalam penyimpanan sangat diperlukan kualitas wadah limbah yang kuat sehingga mampu meminimalkan potensi terjadinya degradasi wadah limbah. Namun jika terjadi degradasi wadah, maka harus dilakukan pengepakan kembali wadah limbah tersebut.

Terdapat dua teknik penanganan wadah limbah yang terdegradasi^[23,24]:

1. Jika degradasi wadah limbah tidak terlalu berat, dalam arti wadah limbah masih bisa diangkat dengan aman maka pewadahan kembali dilakukan dengan memasukkan wadah limbah yang terdegradasi kedalam wadah yang lebih besar yang terbuat dari bahan baja karbon atau baja tahan karat. Rongga antara wadah semula dengan wadah yang baru diberi lapisan beton (campuran pasir, semen dan koral).
2. Jika degradasi wadah cukup berat dan tidak memungkinkan dilakukan pengangkatan wadah, maka digunakan dua jenis wadah yang terbuat dari bahan baja karbon atau baja tahan karat. Wadah pertama berupa basket yang berfungsi untuk menampung wadah limbah yang terdegradasi, dan kemudian basket yang telah berisi wadah limbah yang terdegradasi dimasukkan ke dalam wadah kedua yang berupa drum. Gambar 11A menunjukkan bentuk basket dan Gambar 11B menunjukkan bentuk drum untuk wadah limbah terdegradasi. Dengan teknik pewadahan berlapis ini diharapkan wadah dapat bertahan dalam jangka waktu yang lebih panjang sehingga akan menjamin keselamatan dari bahaya radiasi bagi masyarakat dan pekerja



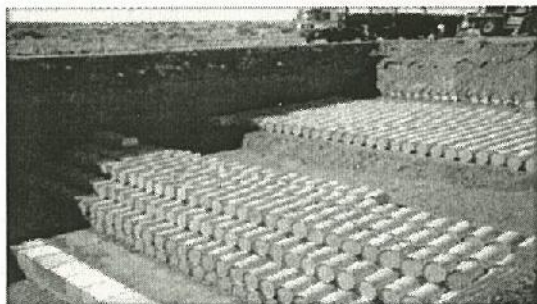
Gambar 11. Wadah Limbah Terdegradasi
(A) Basket dan B) Drum^[23,24]

Sesuai dengan prinsip pengelolaan limbah, maka disposal atau penyimpanan akhir limbah sebagai bagian ujung belakang dari tahapan

pengelolaan limbah radioaktif, bertujuan untuk mengisolasi limbah sehingga tidak terjadi paparan radiasi terhadap manusia dan lingkungan. Tingkat pengisolasian yang diperlukan dapat diperoleh dengan mengimplementasikan berbagai metode penyimpanan akhir, diantaranya dengan model disposal dekat permukaan (*near surface disposal*) dan penyimpanan akhir pada formasi geologi (*geological disposal*) sebagai pilihan yang umum untuk diterapkan di banyak negara^[25,26].

Pada sistem disposal dekat permukaan, fasilitas penyimpanan diletakkan pada atau di bawah permukaan tanah, dengan ketebalan lapisan pelindung beberapa meter. Dalam beberapa kasus lapisan pelindung tersebut bisa mencapai beberapa puluh meter pada tipe fasilitas *rock cavern*. Fasilitas-fasilitas tersebut dikhususkan untuk limbah aktivitas rendah dan sedang yang tidak mengandung radionuklida berumur panjang. Gambar 12 menunjukkan contoh penyimpanan limbah dekat permukaan sebagai penyimpanan akhir limbah radioaktif aktivitas rendah sedang yang tidak mengandung radionuklida berumur paro panjang^[27].

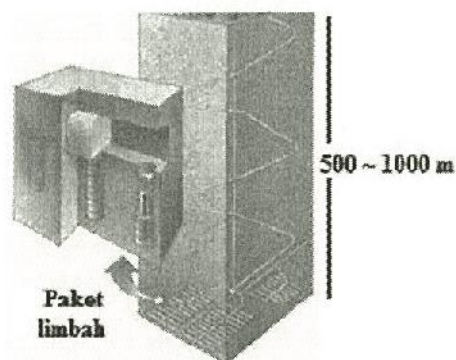
Pada saat ini pengelolaan pradisposal limbah torium belum sampai pada tahap akhir yaitu penerimaan paket limbah pada lokasi disposal. Hal ini terkait dengan kesiapan disposal limbah torium.



Gambar 12. Disposal Limbah Radioaktif Dekat Permukaan^[27]

Penyimpanan pada formasi geologi, fasilitas penyimpanan diletakkan pada kedalaman beberapa ratus meter hingga seribu meter (500 ~1000 m) di bawah permukaan tanah, sehingga sering disebut juga dengan istilah *deep geological disposal*. Fasilitas ini dikhususkan untuk limbah aktivitas tinggi dan yang mengandung radionuklida berumur paro panjang. Gambar 13 menunjukkan contoh konsep penyimpanan pada formasi geologi. Sesuai dengan umur paro torium yang sangat panjang, maka penyimpanan akhir limbah ini nantinya harus dilakukan pada formasi geologi. Fasilitas disposal ini dilengkapi dengan penghalang rekayasa (*multi engineer barrier*) yang terdiri dari limbah terkondisioning dalam wadah, *buffer material*, *overpack*, *backfill material* dan kondisi geologi setempat. Dengan penghalang rekayasa ini

diharapkan limbah akan terkungkung dengan selamat dalam tanah sehingga masyarakat dan lingkungan akan terlindungi dari dampak radiologis dari limbah radioaktif tersebut^[28].



Gambar 13. Disposal pada Formasi Geologi^[28]

KESIMPULAN

Limbah torium yang ditimbulkan dari pabrik kaos lampu petromaks merupakan limbah radioaktif yang mengandung radionuklida berumur paro panjang yang memerlukan pengelolaan pradisposal dan disposal yang rumit dan seperti untuk saat ini sudah tidak cocok lagi kalo hanya untuk kaos lampu petromaks. Oleh karena itu penggunaan lampu petromaks saat ini sudah tidak relevan lagi. Pusat Teknologi Limbah Radioaktif telah mengelola limbah torium dari pabrik kaos lampu petromaks dengan cara kondisioning. Konsep kondisioning dilakukan dengan mempertimbangkan fakta bahwa sampai dengan saat ini belum ada kriteria yang spesifik dalam pengelolaan limbah torium, sehingga kondisioning harus dilakukan dengan prinsip kemudahan membongkar kembali kemasan limbah yang telah terkondisioning tersebut di masa mendatang. Evaluasi hasil kondisioning telah dilakukan dengan hasil bahwa tidak terdeteksi adanya kebocoran gas thoron dari dalam paket limbah torium ke lingkungan. Pemantauan dosis radiasi personil, daerah kerja dan bahkan lingkungan PTLR serpong sampai radius 5 kilometer menunjukkan bahwa keselamatan pekerja terhadap bahaya radiasi masih dalam batas yang selamat dan tidak terdeteksi adanya pencemaran lingkungan. Pengelolaan pradisposal limbah torium belum sampai pada tahap akhir yaitu penerimaan paket limbah pada lokasi disposal. Hal ini terkait dengan kesiapan fasilitas disposal limbah torium. Sesuai dengan umur paro radionuklida torium yang panjang, maka disposal limbah ini cocok dilakukan pada formasi geologi sehingga limbah akan terkungkung dengan selamat dalam tanah sehingga masyarakat dan lingkungan akan terlindungi dari dampak radiologis dari limbah radioaktif tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

1. WORLD NUCLEAR ASSOCIATION, "Radioactive Waste Management", Available: <http://world-nuclear.org>, diakses 6 -10- 2010.
2. ARGONNE NATIONAL LABORATORY, EVS, "Thorium, Human Health Fact Sheet", Available: <http://www.evs.anl.gov>, diakses 10-11-2010.
3. LUETZELSCHWAB, J. W., GOOGING, S. W., Radioactivity Released from Burning Gas Lantern Mantles, *Health Physics*, 46, 873, 1984.
4. REPUBLIK INDONESIA, Undang-Undang No. 10/1997 tentang Ketenaganukliran, RI 1997.
5. AUSTRALIAN RADIATION PROTECTION AND NUCLEAR SAFETY AGENCY, "Predisposal Management of Radioactive Waste" (Radiation Protection Series Publication No. 16), ARPNSA, Australia 2008.
6. IAEA, "Standards Predisposal Management of Radioactive Waste" (Safety Standards Series No. GSR Part 5), IAEA, Vienna, 2009.
7. PUSAT TEKNOLOGI LIMBAH RADIOAKTIF, "Laporan analisis Keselamatan Rev. 5", PTLR, Serpong, 2006.
8. ANONYMOUS, "Pusat Teknologi Limbah Radioaktif", Available: <http://www.batan.go.id/ptlr/11id/>, diakses 05 -01- 2011.
9. ANONYMOUS, "Lantern Mantles", Available: <http://www.traditioncreek.com>, diakses 06-01-2011.
10. ALADIN OF BOURKE St., "Mantle Lamp", Advertising leaflet, Available: <http://homepage.ntlworld.com>, diakses 12-09-2010.
11. ANONYMOUS, "Coleman Dual-Fuel 2-Mantle Lantern", Available: <http://www.rei.com/product/410078/coleman-dual-fuel-2-mantle-lantern>, diakses 16-09-2010.
12. COLEMAN, "Coleman Two-Mantle Dual Fuel Lantern with Hard Case", Available: <http://www.amazon.com/Coleman-Two-Mantle-Dual-Fuel-Lantern/dp/B0009PURIQ>, diakses 16-08-2010.
13. ANONYMOUS, "How to Light a Coleman Lantern With a Mantle", Available: <http://coleman.custhelp.com>, diakses 12-09-2010
14. DENIS, L., et. al, "The ²³² Thorium Decay Chain", Teacher's Notes. Available: <http://home.clara.net/camplin/PRT/Tastrak/TNotes/Chap6.htm>, diakses 08-09-2010.
15. DORETTI, L., FERRARA, D., and BARISON, G., Determination of Thorium Isotopes in Gas Lantern Mantles by α -Spectrometry, *J. Radioanalytical Nuclear Chemistry*, Art 141, 203, 1990.
16. ANONYMOUS, "Thorium", Available: <http://periodictable.com/Elements/090/index.html>, diakses 08-10-2010
17. BUNAWAS, dkk., Metoda Dwitapis untuk Memperkirakan Kontaminasi Interna Thorium Dengan Mengukur Thoron Hasil Pernafasan Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah, PPNY-BATAN, Yogyakarta (1993).
18. YU, K. N., GUAN, Z. J., et. al., Active Measurements of Indoor Concentration of Radon and Thoron Gas using Charcoal Canister, *Appl. Radiat. Isot.*, 49 (12) (1998), 1691-1694, 1998.
19. AISYAH, dkk., Pengukuran Lepas Gas Thoron Pada Hasil Kondisioning Limbah Thorium (Hasil Penelitian dan Kegiatan P2PLR Tahun 2001), P2PLR, Serpong, 2002.
20. MUZIYAWATI, A., dkk., Pengaruh Kandungan Limbah Tanah dari PT. Tasuma Terhadap Kekuatan Fisika dan Kimia Beton Limbah, Prosiding Hasil Penelitian dan Kegiatan Pusat Teknologi Limbah Radioaktif Tahun 2005, PTLR, Serpong, 2006.
21. WIDAYATI, S., dkk., Pemantauan Dosis Radiasi Personil Di Pusat Penelitian Tenaga Nuklir Serpong, Hasil Penelitian dan Kegiatan Pusat Teknologi Limbah Radioaktif Tahun 2006, PTLR, Serpong, 2007.
22. UNTARA, Pemantauan Lingkungan di Sekitar Pusat Penelitian Tenaga Nuklir Serpong Dalam Radius 5 Km (Hasil Penelitian dan Kegiatan Pusat Teknologi Limbah Radioaktif Tahun 2006), PTLR, Serpong, 2007.
23. GHEORGHE, D. C., Conditioning of Degradated Packages With Radioactive Waste, WM'02 Conference, February 24-28, Tucson, Arizona, 2002.
24. UNTARA, Kajian Keselamatan Penyimpanan Limbah Thorium Dari Pabrik Kaos Lampu (Hasil Penelitian dan Kegiatan Pusat Teknologi Limbah Radioaktif Tahun 2006), PTLR, Serpong, 2007.
25. ANONYMOUS, "Nuclear Waste Storage", Available: <http://library.thinkquest.org>, diakses 25-01-2011.
26. ANONYMOUS, "Nuclear Waste Disposal", Available: <http://www.history.rochester.edu>, diakses 25-01-2011.
27. ANONYMOUS, "Info Nuklir: Strategi Pengelolaan Limbah Radioaktif PLTN", Available: http://www.infonuklir.com/readmore/read/pltn/pengolaan_limbah/PLTN, diakses 14 -01-2011.
28. BYRNE, P., "Nordic Researchers Model Repository of Nuclear Waste", Available: <http://www.designworldonline.com/articles/6826/244/Nordic-Researchers-Model-Repository-of-Nuclear-Waste.aspx>, diakses 14 -01-2011.