

## KETAHANAN KOROSI WADAH LIMBAH RADIOAKTIF AKTIVITAS RENDAH DAN TINGGI

Aisyah

PTLR-BATAN, Kawasan Puspipstek Serpong, Tangerang Selatan 15310

### ABSTRAK

*Baja tahan karat austenitik digunakan sebagai bahan wadah limbah aktivitas tinggi karena memiliki karakteristik ketahanan korosi yang bagus dibandingkan dengan baja karbon sebagai bahan wadah limbah aktivitas rendah. Sesuai dengan fungsinya, wadah limbah aktivitas tinggi didisain agar mampu mengungkung radionuklida umur paro panjang yang terkandung dalam limbah dalam jangka waktu lama. Sedangkan wadah limbah aktivitas rendah didisain hanya mampu mengungkung radionuklida umur paro pendek dalam waktu terbatas. Karakteristik ketahanan korosi wadah limbah ini ditentukan berdasarkan data laju korosi dan laju pelindiannya. Laju korosi wadah limbah aktivitas tinggi sangat rendah yaitu dalam orde seperatusan kali laju korosi wadah limbah aktivitas rendah. Hal ini karena wadah limbah aktivitas tinggi mengandung unsur-unsur pepadu seperti krom, titanium atau kadar karbon yang rendah yang dapat menghambat terjadinya korosi. Untuk wadah limbah aktivitas rendah yang berupa shell beton mempunyai harga laju pelindihan yang sangat kecil, artinya wadah ini mampu mengungkung radionuklida yang ada didalamnya dengan selamat.*

*Kata kunci: Korosi, wadah limbah radioaktif, limbah aktivitas rendah, limbah aktivitas tinggi*

### ABSTRACT

#### **THE CORROSION RESISTANCE OF LOW AND HIGH LEVEL RADIOACTIVE WASTE CANISTER .**

*The austenitic stainless steel is used as material of high level waste canister because of it's good characteristic of corrosion resistance compare with material of low level waste canister. As it's function , the high level waste canister is designed to be able to restrain long live radionuclide that content in the waste for long time. The low level waste canister is designed to restrain the short live radionuclide for limited time. The characteristic of corrosion resistance of waste canister is defined on the basis of its corrosion rate and leaching rate. The corrosion rate of high level waste canister is very low as orde one hundredth smaller than corrosion rate of low level waste canister It is because the high level waste canister was content of compound element such as chromium, titanium or low carbon that can block the corrosion. The concrete shell have very low leaching rate, means that it is able to restrain the radionuclide inside safely.*

*Keywords: Corrosion, radioactive waste canister, low level waste, high level waste.*

### PENDAHULUAN

Pemanfaatan teknologi nuklir di Indonesia telah berkembang secara luas dalam berbagai bidang seperti dalam bidang penelitian, kedokteran, pusat-pusat reaktor dan tak lama lagi mungkin akan berdiri Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Tentu saja sejalan dengan hal itu akan ditimbulkan limbah radioaktif yang salah satunya adalah limbah radioaktif yang berasal dari proses daur bahan bakar nuklir.

Daur bahan bakar nuklir merupakan rangkaian proses yang terdiri dari penambangan bijih uranium, penggilingan, konversi, pengayaan uranium dan konversi ulang menjadi logam uranium. Logam uranium selanjutnya diubah menjadi elemen bakar nuklir melalui proses fabrikasi. Bahan bakar nuklir kemudian dimasukkan ke dalam reaktor dan mengalami reaksi inti. Bahan bakar yang sudah tidak efektif digunakan, dikeluarkan dari reaktor sebagai bahan bakar bekas untuk didinginkan selama beberapa waktu, kemudian dilakukan penyimpanan atau diangkut menuju fasilitas

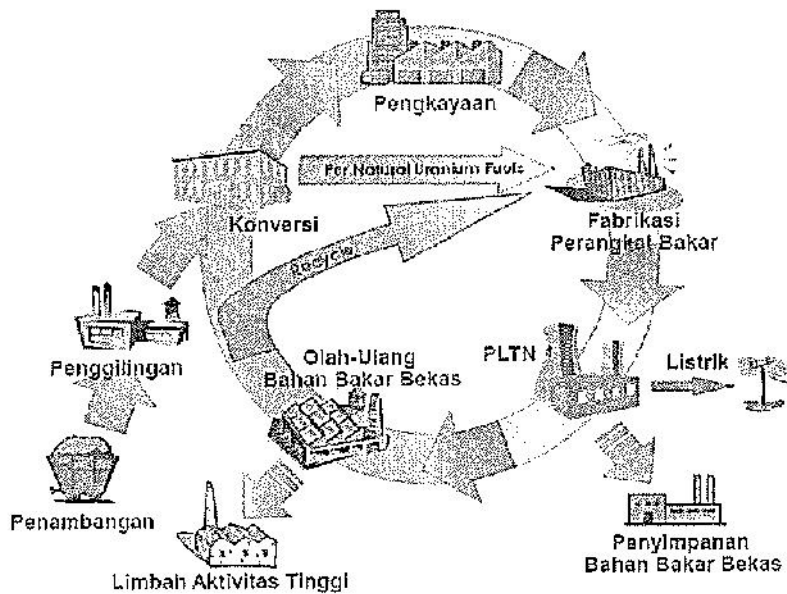
pengolahan ulang tergantung dari siklus yang dipilih. Gambar 1 menunjukkan skema daur bahan bakar nuklir.<sup>1-3</sup>

Dalam teknologi daur bahan bakar nuklir, terdapat istilah daur tertutup dan daur terbuka. Daur tertutup adalah suatu sistem daur bahan bakar nuklir dengan melakukan proses olah ulang bahan bakar bekas (reprocessing) untuk memungut uranium sisa (*recovered uranium*) dan bahan plutonium fisil untuk diimpitkan kembali sebagai bahan bakar. Pada sistem daur terbuka, tidak dilakukan proses olah ulang. Bahan bakar bekas disimpan pada penyimpanan sementara untuk suatu saat dikirim ke fasilitas penyimpanan lestari. Sistem daur terbuka juga bisa berarti *wait and see*, masih terbuka untuk pilihan apakah memilih daur dengan

olah ulang atau daur tanpa olah ulang.

Limbah radioaktif yang ditimbulkan dari proses daur bahan bakar nuklir adalah limbah aktivitas rendah dan limbah aktivitas tinggi. Limbah aktivitas rendah ditimbulkan dari pengoperasian PLTN dan limbah aktivitas tinggi ditimbulkan dari proses olah ulang bahan bakar bekas jika menganut daur bahan bakar tertutup dan bahan bakar bekas.

Saat ini Indonesia belum menentukan sikap apakah memilih daur terbuka atau tertutup. Tapi yang jelas Indonesia belum memiliki PLTN, sehingga limbah aktivitas rendah yang dimaksud dalam makalah ini adalah limbah aktivitas rendah yang ditimbulkan dari pengoperasian reaktor Serba Guna G.A. Siwabessy beserta laboratorium pendukungnya.



Gambar 1. Daur Bahan Bakar Nuklir<sup>1-3</sup>

Sedangkan limbah aktivitas tinggi saat ini berupa bahan bakar bekas. Namun demikian, untuk penguasaan teknologi pengolahan limbah aktivitas tinggi, dalam makalah ini yang akan dibahas adalah limbah aktivitas tinggi yang berasal dari proses olah ulang bahan bakar bekas. Hal ini dimaksudkan sebagai langkah antisipatif jika suatu saat dipilih opsi daur tertutup.

Bahasan pengelolaan limbah aktivitas rendah didasarkan pada pengalaman Pusat Teknologi Limbah Radioaktif dalam melakukan pengelolaan limbah aktivitas rendah, sedangkan bahasan pengelolaan limbah aktivitas tinggi berdasarkan pengalaman beberapa negara maju yang melakukan proses olah ulang seperti Jepang.

Limbah aktivitas rendah adalah limbah yang

mengandung radionuklida berumur paro pendek dengan aktivitas yang rendah, sedangkan limbah aktivitas tinggi mengandung radionuklida yang berumur paro panjang dengan aktivitas yang cukup tinggi. Sejalan dengan jenis radionuklida yang dikandungnya, maka teknologi penyimpanan akhir kedua jenis limbah inipun berbeda. Limbah aktivitas rendah cukup disimpan pada penyimpanan dekat permukaan (*Near Surface Disposal*), sedangkan limbah aktivitas tinggi memerlukan penyimpanan akhir pada formasi geologi (*Geologic Formation*).<sup>4-6</sup> Oleh karena itu dalam pengelolaannya limbah aktivitas rendah memerlukan wadah dengan karakteristik yang berbeda dengan wadah limbah aktivitas tinggi. Wadah limbah aktivitas tinggi mestinya

memerlukan karakteristik yang lebih tinggi dibandingkan dengan wadah limbah aktivitas rendah. Hal ini berdasarkan pada fungsinya dalam penyimpanan akhir bahwa wadah limbah aktivitas tinggi harus mampu mengungkung radionuklida yang terkandung didalamnya dalam waktu yang cukup lama dibandingkan dengan wadah limbah aktivitas rendah.

Mengingat limbah ini pada akhirnya akan disimpan lestari dekat permukaan atau formasi geologi dimana suatu saat air tanah dapat mencapai wadah, maka diperlukan karakteristik ketahanan korosi wadah yang cukup tinggi. Karakteristik ketahanan korosi wadah ini sangat penting dalam pemilihan jenis bahan untuk wadah limbah tersebut. Bahan dengan karakteristik korosi yang bagus akan mampu menahan terlepasnya radionuklida yang masih potensial keluar ke lingkungan, sehingga wadah dapat didisain sesuai dengan umur radionuklida yang terkandung didalamnya.

Dalam makalah ini akan dibahas mengenai karakteristik ketahanan korosi dari beberapa jenis bahan wadah limbah aktivitas rendah dan tinggi. Bahasan didasarkan pada teori dan pengalaman negara maju dalam melakukan pengelolaan limbah radioaktif. Hal ini dimaksudkan agar dapat dipilih bahan wadah limbah yang tepat sehingga wadah mampu dan selamat dalam mengungkung radionuklida yang ada didalamnya.

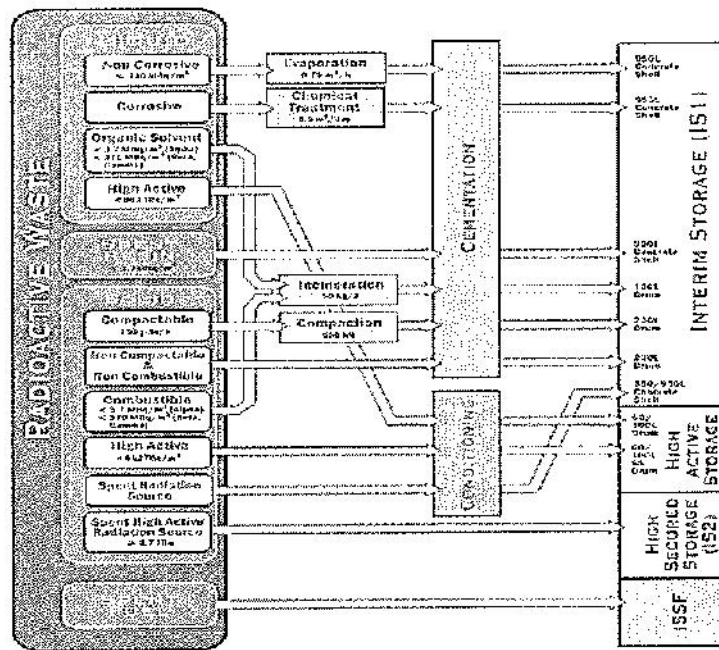
Makalah kajian ini dilakukan di Bidang Teknologi Pengolahan Limbah Radioaktif Dekontaminasi dan Dekomisioning di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), Kawasan Puspitck Serpong pada Tahun 2010.

## PENGOLAHAN LIMBAH AKTIVITAS RENDAH

Limbah radioaktif aktivitas rendah dan sedang dapat berupa limbah cair, semi cair ataupun padat

dengan aktivitas rendah ( $10^{-6} < A \leq 10^{-3}$ ) dan sedang ( $10^{-3} < A \leq 10^{-1}$ )  $\mu\text{Ci/ml}$  (untuk selanjutnya ke dua jenis limbah ini akan disebut sebagai limbah aktivitas rendah). Limbah padat aktivitas rendah dapat berasal dari proses kegiatan yang menggunakan bahan radioaktif ataupun alat-alat kerja yang terkontaminasi, misalnya pakaian, kertas, filter, sepatu, sarung tangan dan sebagainya. Sedangkan limbah cair biasanya berasal dari air pendingin reaktor. Limbah aktivitas rendah memerlukan proses solidifikasi dengan semen kemudian disimpan pada penyimpanan dekat permukaan<sup>7-9</sup>. Sistem penyimpanan ini berada pada atau dibawah permukaan tanah dengan ketebalan penutup beberapa meter.

Sebagai contoh adalah pengelolaan limbah radioaktif aktivitas rendah yang telah dilakukan di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR)<sup>10,11</sup> Limbah jenis ini berupa limbah cair, semi cair dan limbah padat. Limbah padat berasal dari internal Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) dan dari instansi di luar BATAN, limbah radioaktif semi cair (pada umumnya berupa resin bekas) dan limbah cair sebagian besar berasal dari pengoperasian Reaktor Serbaguna G.A Siwabessy yang berupa air pendingin reaktor. Reduksi volume limbah radioaktif padat dilakukan dengan proses insenerasi dan kompaksi, sedangkan reduksi volum limbah radioaktif cair dilakukan dengan proses evaporasi. Hasil reduksi volum limbah radioaktif padat diimobilisasi dengan semen dan dimasukkan dalam wadah yang berupa drum 200 liter, sedangkan konsentrat hasil evaporasi limbah radioaktif cair juga diimobilisasi dengan semen dan dimasukkan dalam wadah yang berupa shell beton 950 liter. Limbah radioaktif semi cair langsung diimobilisasi dengan semen dalam shell beton 950 liter. Selain itu juga terdapat shell beton 350 liter sebagai wadah limbah radioaktif padat yang mampu menahan radiasi yang lebih tinggi. Secara lengkap pengelolaan limbah radioaktif yang dilakukan di PTLR ditunjukkan pada Gambar 2.<sup>10,11</sup>



Gambar 2. Pengelolaan Limbah Radioaktif di PTLR<sup>10,11</sup>

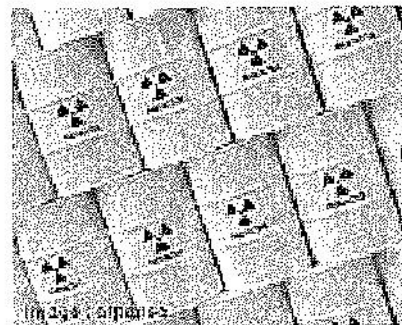
**WADAH SEMEN LIMBAH**

Imobilisasi limbah aktivitas rendah baik cair, semi cair maupun padat dilakukan dengan semen. Sementasi limbah dilakukan dalam wadah dimana dalam hal ini wadah sekaligus berfungsi sebagai reaktor dalam proses sementasi. Terdapat tiga jenis wadah semen limbah, yaitu yang berupa drum 200 liter, shell beton 950 dan 350 liter. Masing-masing wadah limbah diperuntukkan untuk karakteristik limbah yang berbeda.

Drum 200 liter merupakan salah satu wadah limbah aktivitas rendah yang terbuat dari plat baja karbon DIN St 37-2 dengan tinggi sekitar 88 cm dan diameter 29,3 cm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3<sup>14</sup>. Drum ini mampu memuat 4 – 5 buah drum 100 liter yang telah terkompaksi. Limbah radioaktif padat awalnya ditampung dalam drum 100 liter. Drum 100 liter yang telah berisi limbah padat dikompaksi dengan alat kompaktor dengan kekuatan 600 kN. Drum 200 liter yang telah berisi 4-5 drum 100 liter terkompaksi kemudian diimobilisasi dengan campuran semen pasir sampai seluruh permukaan dan sela-sela diantara drum 100 liter terlindungi dengan adonan semen. Setiap satu drum 200 liter dibutuhkan 100 kg semen dan 25 kg pasir. Selanjutnya drum yang telah berisi semen-limbah ini disimpan sementara dalam tempat penyimpanan sementara limbah radioaktif (*Interim Storage*)<sup>10, 12,13,14</sup>

Shell beton 950 liter adalah wadah konsentrat limbah aktivitas rendah dan wadah resin bekas yang sudah diimobilisasi. Shell ini terbuat dari beton yaitu campuran semen dan pasir dengan ketebalan

10 cm, tinggi 130 cm dan diameter luar 140 cm yang mempunyai kemampuan menampung limbah dengan aktivitas maksimum 1 curie.<sup>4</sup> Limbah aktivitas rendah yang sebagian besar berasal dari operasional air pendingin Reaktor GA. Siwabessy dilakukan reduksi volume dengan evaporator. Konsentrat hasil evaporasi kemudian dicampur dengan adonan semen pasir dan ditempatkan dalam wadah shell beton 950 liter.



Gambar 3. Drum 200 Liter Wadah Semen Limbah<sup>14</sup>

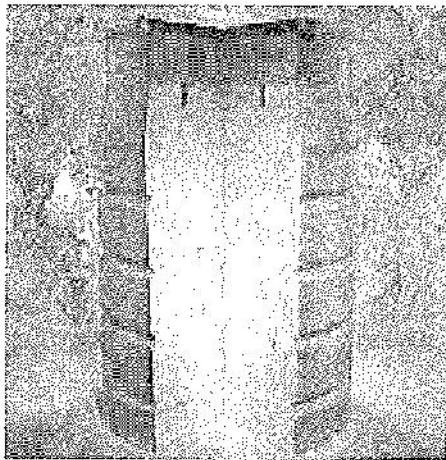
Dalam satu shell beton 950 liter memuat konsentrat limbah/resin 235 liter, semen 600 kg dan pasir 400 kg.<sup>10,12,13</sup>

Shell beton 350 liter juga merupakan wadah limbah radioaktif, dengan tinggi dan diameter luar yang sama dengan shell beton 950 liter, namun shell ini terutama diperuntukkan untuk menampung limbah-padat tak terkompaksi dengan radioaktivitas tinggi, seperti misalnya sumber bekas. Oleh karena itu wadah ini didisain mempunyai ketebalan yang

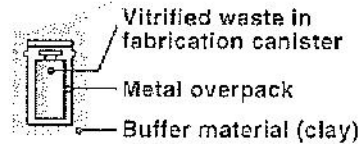
lebih besar dibandingkan dengan shell beton 950 liter. Dengan ketebalan 30 cm, shell ini mampu menampung limbah padat dengan aktivitas maksimum 6 curie.<sup>4</sup> Gambar 4 menunjukkan bentuk shell beton 950 liter atau 350 liter<sup>10</sup>.

### PENGOLAHAN LIMBAH AKTIVITAS TINGGI

Limbah aktivitas tinggi dapat berupa limbah cair ataupun padat yang berasal dari laboratorium pengujian bahan bakar ataupun limbah dari proses olah-ulang bahan bakar bekas reaktor dengan aktivitas yang cukup tinggi yaitu sekitar  $(10^4 < A \leq 10^6)$   $\mu\text{Ci/ml}$ . Limbah ini memerlukan proses vitrifikasi dengan gelas kemudian disimpan pada formasi geologi<sup>4,13,16,17</sup>. Gambar 5 menunjukkan sistem penyimpanan gelas limbah pada formasi geologi.<sup>17</sup> Pada penyimpanan formasi geologi limbah disimpan pada kedalaman 500~1000 meter yang dilengkapi dengan penahan ganda rekayasa agar keselamatan lingkungan benar-benar terjamin. Sistem penahan ganda rekayasa tersebut berupa limbah terunobilisasi (*vitrified waste*), wadah (*canister*), *overpack*, *buffer material*, dan kondisi geologi setempat<sup>(18,19)</sup>.

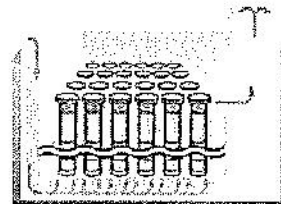


Gambar 4. Shell Beton 950 Liter atau 350 Liter<sup>10)</sup>



Gambar 5. Sistem Penyimpanan Limbah Aktivitas Tinggi Pada Formasi Geologi<sup>17)</sup>

Salah satu contoh adalah pengelolaan limbah cair aktivitas tinggi (LCAT) yang ada di *Japan Nuclear Cycle Development Institute (JNC)* Jepang<sup>4, 15,16,17</sup> yang secara ringkas digambarkan sebagai berikut: limbah cair aktivitas tinggi ini berasal dari proses olah-ulang bahan bakar bekas reaktor. Bahan bakar setelah keluar dari reaktor mengalami pendinginan (peluruhan) selama 6 bulan dalam kolam penyimpanan. Setelah pendinginan, bahan bakar dilarutkan dalam larutan asam nitrat ( $\text{HNO}_3$ ) dengan konsentrasi 6~8 M. Hasil pelarutan diekstraksi untuk memisahkan aktinida: uranium (U), plutonium (Pu) dan hasil belah lainnya. Proses ini disebut ekstraksi siklus pertama. Dari hasil proses ekstraksi ini akan diperoleh larutan yang banyak mengandung hasil belah dan sedikit aktinida, larutan inilah yang disebut LCAT. Limbah cair aktivitas tinggi ini memerlukan pendinginan sekitar 4 tahun sebelum dilakukan vitrifikasi dengan gelas borosilikat. Hasil vitrifikasi berupa lelehan gelas-limbah dimasukkan dalam wadah pada suhu 1100° C. Wadah yang telah terisi gelas-limbah disimpan dalam penyimpanan sementara (*interim storage*) selama 30~50 tahun yang dilengkapi dengan sistem pendingin udara hembus seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 6<sup>20)</sup>. Sistem pendingin ini dimaksudkan untuk mencegah kerusakan gelas-limbah akibat panas yang terus dipancarkan oleh radionuklida dalam gelas-limbah.

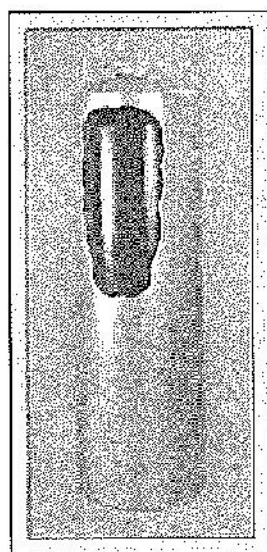


Gambar 6. Sistem Pendinginan Udara Hembus Pada Penyimpanan Sementara Gelas-Limbah<sup>20)</sup>

## Wadah Gelas Limbah

Vitrifikasi limbah aktivitas tinggi dilakukan dengan gelas borosilikat. Gelas limbah hasil vitrifikasi kemudian dimasukkan kedalam wadah. Wadah gelas-limbah terbuat dari baja tahan karat austenitik yang berbentuk silinder dengan diameter luar 430 mm, tinggi 1040 mm dan tebal 6 mm, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 7.<sup>4,21</sup> Bagian alas wadah berbentuk lengkung dan disambung dengan kaki yang menyangga seluruh berat wadah dan isi. Pada bagian atas dilengkapi dengan mulut penuangan dan sumbat. Setelah proses penuangan gelas-limbah kedalam wadah, sumbat ditutupkan pada mulut dan dilas mati.

Kapasitas wadah adalah 300 kg gelas-limbah. Pengisian gelas-limbah kedalam wadah dilakukan pada suhu leleh gelas-limbah 1100 °C dengan laju alir sebesar 150 kg/jam, sehingga pengisian akan memakan waktu 2 jam. Seperti diketahui bahwa kelemahan baja tahan karat austenitik adalah ketika bahan ini mendapat perlakuan panas pada saat pemakaian, maka baja tahan karat akan mengalami penurunan karakteristik ketahanan korosinya. Oleh karena itu pemilihan jenis bahan harus tepat agar proses pemangan gelas limbah kedalam wadah tidak mengakibatkan ketahanan korosi wadah menurun.



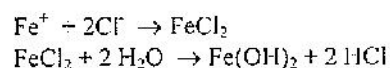
Gambar 7. Wadah Gelas-Limbah<sup>[21]</sup>

## KETAHANAN KOROSI WADAH LIMBAH DALAM PENYIMPANAN

Wadah limbah radioaktif setelah periode waktu tertentu disimpan dalam penyimpanan sementara yang untuk selanjutnya wadah limbah tersebut akan dipindahkan ke dalam penyimpanan lestari limbah yaitu pada penyimpanan dekat permukaan untuk penyimpanan limbah aktivitas rendah dan

penyimpanan pada formasi geologi bagi limbah aktivitas tinggi. Sistem penyimpanan lestari didisain sedemikian rupa agar potensi terlepasnya radionuklida ke lingkungan bisa diminimalkan. Untuk maksud itulah maka pada penyimpanan lestari limbah aktivitas tinggi dilengkapi dengan penahan ganda rekayasa. Dengan harapan agar radionuklida yang masih cukup potensial terhalang untuk sampai ke lingkungan. Namun demikian, jika suatu saat air tanah sempat mencapai wadah, maka akan terjadi korosi wadah. Juga dikaji ketahanan korosi wadah dalam media larutan NaCl. Ini dimaksudkan sebagai simulasi jika tempat penyimpanan lestari limbah radioaktif terletak dekat laut, sehingga jika suatu saat terjadi intrusi air laut ke tempat penyimpanan lestari dan akhirnya sempat kontak dengan wadah limbah.

Tabel 1 menyajikan data karakteristik laju korosi wadah limbah aktivitas rendah dan aktivitas tinggi dari wadah yang terbuat dari logam, sedangkan data laju pelindihan mewakili karakteristik ketahanan korosi wadah limbah aktivitas rendah yang berupa shell beton<sup>[22-27]</sup>. Wadah limbah aktivitas tinggi yang terbuat dari baja tahan karat (AISI 304, 304L dan 321) mempunyai ketahanan korosi yang lebih bagus dalam media air tanah dari pada dalam media larutan NaCl, hal ini karena adanya unsur Cl<sup>-</sup> yang sangat agresif yang bereaksi dengan Fe<sup>+</sup> atau ion-ion logam yang terbentuk akibat reaksi oksidasi dan akhirnya membentuk karat<sup>[28]</sup>. Jika semakin banyak ion-ion logam yang terbentuk maka akan semakin banyak karat yang terbentuk dan mengakibatkan logam terkikis sedikit demi sedikit. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut:



Untuk ke tiga jenis baja tahan karat tersebut, AISI 321 mempunyai ketahanan korosi yang paling tinggi dibandingkan dengan AISI 304L dan 304. Hal ini terjadi karena adanya kandungan titanium yang merata dalam bahan AISI 321 akan menekan terjadinya korosi (korosi batas butir). Titanium akan bereaksi dengan oksigen membentuk TiO<sub>2</sub> yang menghambat terjadinya reaksi korosi.

Tabel 1. Karakteristik Laju Korosi /Laju Pelindihan Wadah Limbah<sup>21-27</sup>

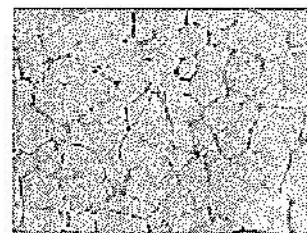
No.	Jenis limbah	Bahan wadah	Laju korosi/ Laju pelindihan	Keterangan
1.	Limbah aktivitas tinggi • Gelas limbah	Baja tahan karat: • AISI 304	0,0181 mpy	Dalam media air tanah
		• AISI 304 L	0,0102 mpy	
2.	Limbah aktivitas rendah • Semen-limbah padat terkompaksi	• AISI 321	0,0093 mpy	Dalam media larutan NaCl
		Baja tahan karat: • AISI 304	0,045 mpy	
		• AISI 304 L	0,028 mpy	
3.	Limbah aktivitas rendah • Semen-konsentrat limbah • Semen-resin	• AISI 321	0,0146 mpy	Dalam media air tanah
		Baja karbon DIN St 37-2.	5,041 mpy	
4.	Limbah aktivitas rendah • Semen-konsentrat limbah • Semen-resin	Baja karbon DIN St 37-2.	17,032 mpy	Dalam media larutan NaCl
		Shell beton 950 liter	Tidak terdeteksi	
4.	Limbah padat tak terkompaksi dengan radioaktivitas tinggi • Sumber bekas • Tabung bekas produksi Mo-99	Shell beton 950 liter	Tidak terdeteksi	Dalam media air tanah
		Shell beton 350 liter	Tidak terdeteksi	

Demikian juga untuk bahan AISI 304L, kandungan karbon yang rendah mengakibatkan reaksi korosi sulit berlangsung<sup>29,30</sup> Oleh karena itu laju korosi yang paling besar adalah AISI 304 karena bahan ini memiliki kandungan karbon yang cukup tinggi, kemudian menurun pada AISI 304L dan yang paling kecil pada bahan AISI 321. Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan<sup>23,29</sup>, diperoleh informasi bahwa akibat proses penuangan gelas limbah kedalam wadah akan mengakibatkan terjadinya sensitisasi, yaitu terbentuknya presipitat krom karbida ( $Cr_{23}C_6$ ) pada batas butir yang mengakibatkan bahan cenderung mengalami korosi batas butir (*Intergranular Corrosion*). Namun dalam penelitian tersebut juga dinyatakan bahwa presipitat  $Cr_{23}C_6$  yang terbentuk masih sedikit jumlahnya dan masih terisolasi satu sama lain sehingga dikatakan bahwa karakteristik penurunan ketahanan korosi tidak signifikan. Gambar 8 menunjukkan struktur mikro dari baja tahan karat AISI 304 yang mengalami korosi batas butir hasil pengamatan dengan mikroskop optik. Pada gambar tersebut tampak batas butir yang menebal (hitam) yang merupakan bekas jejak presipitat  $Cr_{23}C_6$  yang tumbuh pada batas butir<sup>(23)</sup>. Namun demikian secara ekonomi pemakaian baja tahan karat AISI 321 jauh lebih mahal daripada AISI 304 maupun 304 L.

Dengan diketahuinya karakteristik ketahanan korosi yang dalam hal ini diwakili oleh besaran laju

korosi, dapat diperkirakan terkikisnya wadah setiap tahunnya. Dengan memperhitungkan umur paro radionuklida yang terkandung dalam limbah, dan dengan mengetahui laju korosi bahan wadah maka hal ini dapat dipakai sebagai dasar penentuan ketebalan wadah

Seperti diketahui bahwa untuk wadah limbah aktivitas rendah, pada proses pewadahan awal telah terjadi kontak antara slurry semen dengan wadah limbah yang terbuat dari baja karbon. Dalam jangka waktu lama hal ini dapat memungkinkan terjadinya korosi drum, bahkan mungkin masih dalam periode penyimpanan sementara.



Gambar 8. Struktur Mikro Baja Tahan Karat AISI 304 yang Cenderung Mengalami Korosi Batas Butir.<sup>[23]</sup>

Oleh karena itu kondisi drum yang seperti ini jika pada penyimpanan lestari wadah sempat kontak dengan air tanah, maka laju korosi akan dipercepat. Wadah limbah padat aktivitas rendah terkompaksi adalah drum 200 liter dari baja karbon DIN St 37-2.

Bahan ini memiliki laju korosi yang lebih tinggi dalam media larutan NaCl daripada dalam media air tanah. Hal ini karena adanya ion  $\text{Cl}^-$  yang agresif yang akan bereaksi dengan  $\text{Fe}^+$  dan mengakibatkan timbul karat yang lama kelamaan logam terkorosi dan terkikis<sup>31</sup>. Harga laju korosi bahan ini lebih besar dari harga laju korosi bahan wadah limbah aktivitas tinggi. Wadah limbah aktivitas tinggi memang didisain untuk menyimpan radionuklida yang berumur paro panjang (jutaan tahun), sedangkan baja karbon DIN St 37-2 sesuai dengan karakteristik ketahanan korosinya didisain untuk menampung radionuklida berumur paro pendek. Itulah sebabnya tidak boleh ada kandungan radionuklida pemancar alfa (berumur paro panjang) dalam limbah aktivitas rendah. Hal ini karena jika dalam limbah aktivitas rendah tercampur radionuklida pemancar alfa yang berumur paro panjang yang melebihi umur wadahnya (drum baja karbon), maka ketika wadah sudah rusak (terkorosi) maka radionuklida pemancar alfa yang tersimpan didalamnya masih cukup potensial dan dapat keluar ke lingkungan.

Untuk wadah limbah aktivitas rendah, yang berupa shell beton 950/350 liter karakteristik ketahanan korosi wadah disajikan dalam bentuk data laju pelindihan. Hal ini terkait dengan kemampuan bahan beton dalam menjaga radionuklida yang terkandung dalam limbah yang juga telah terimobilisasi dengan campuran semen pasir. Bahan shell beton 950 liter maupun 350 liter mempunyai komposisi semen pasir yang sama, hanya berbeda dalam ketebalannya saja. Shell beton 350 liter mempunyai ketebalan yang lebih tinggi dari pada shell beton 950 liter, hal ini hanya karena fungsinya saja. Dimana shell beton 350 liter difungsikan untuk wadah limbah padat dengan radioaktivitas yang lebih tinggi yang mampu menampung limbah dengan aktivitas sampai dengan 6 Ci. Sedangkan shell beton 950 liter dengan ketebalan yang lebih kecil hanya mampu menampung limbah dengan aktivitas maksimum 1 Ci.

Harga laju pelindihan wadah shell beton seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 terlihat sangat kecil bahkan tampak tidak terdeteksi oleh alat analisis. Pengujian ini dilakukan juga terhadap shell beton yang telah berisi limbah konsentrat terimobilisasi. Hal ini menunjukkan bahwa untuk jangka waktu tertentu wadah shell beton mampu mengungkung radionuklida yang ada dalam limbah agar tidak dengan cepat lepas ke lingkungan. Namun demikian, dalam Tabel 1 ditunjukkan pula harga laju pelindihan dari konsentrat limbah yang telah terimobilisasi di dalam shell dengan harga yang masih memenuhi standar yang dipersyaratkan

Dalam periode masa penyimpanan sementara, jika karena sesuatu hal terjadi kerusakan wadah limbah (misal terkorosi), maka jika radionuklida

yang terkandung dalam limbah masih cukup potensial berbahaya bagi manusia dan lingkungan, maka harus dilakukan pewadahan kembali (*repackaging*) limbah.

Dalam Tabel 1 juga tampak bahwa harga laju korosi wadah limbah aktivitas tinggi jauh lebih kecil dari wadah limbah aktivitas rendah bahkan dalam orde kira-kira sekitar 1/270 kali. Hal ini karena baja tahan karat sebagai wadah limbah aktivitas tinggi mengandung paduan unsur-unsur krom, titanium dan kadar karbon yang rendah, dimana unsur-unsur dalam paduan ini berfungsi sebagai penghambat terjadinya korosi. Sedangkan bahan wadah limbah aktivitas rendah (DIN St 37-2) tidak mengandung paduan unsur-unsur penghambat korosi seperti pada baja tahan karat. Namun demikian akan sangat tidak ekonomis jika misalnya menginginkan bahan wadah limbah aktivitas rendah sama dengan aktivitas tinggi yaitu dari bahan baja tahan karat. Disamping harga baja tahan karat jauh lebih mahal juga telah dianalisis dan dievaluasi bahwa dengan ketebalan tertentu baja karbon maupun shell beton sudah cukup mampu dan selamat dalam mengungkung radionuklida yang terkandung dalam limbah sampai batas waktu tertentu dimana radionuklida dalam limbah tidak berpotensi membahayakan manusia dan lingkungan.

## KESIMPULAN

Wadah limbah aktivitas rendah sesuai dengan fungsinya hanya untuk melindungi radionuklida yang berumur paro pendek sehingga cukup terbuat dari bahan baja karbon DIN St 37-2 ataupun dari bahan beton seperti shell beton. Dibandingkan dengan baja tahan karat sebagai wadah limbah aktivitas tinggi, karakteristik ketahanan korosi baja karbon jauh lebih rendah dari baja tahan karat yaitu dalam orde sekitar 1/270 kali. Namun demikian hal ini dipandang cukup selamat sebagai bahan wadah limbah aktivitas rendah. Wadah limbah aktivitas rendah yang berupa shell beton 950/350 liter, sesuai fungsinya dinyatakan bahwa wadah ini memiliki harga laju pelindihan yang memenuhi syarat sebagai wadah limbah aktivitas rendah.

Wadah limbah aktivitas tinggi dipilih bahan dengan karakteristik ketahanan korosi yang tinggi, karena wadah ini diharapkan mampu melindungi radionuklida yang ada didalamnya dalam jangka waktu lama, yaitu ribuan bahkan jutaan tahun. Oleh karena itu dipilih bahan dari baja tahan karat austenitik misalnya jenis AISI 304 yang memiliki karakteristik ketahanan korosi yang jauh lebih baik dari baja karbon. Walaupun baja tahan karat AISI 304 ini cenderung mengalami korosi batas butir jika mengalami perlakuan panas pada saat pemakaian yaitu misalnya pada saat penuangan gelas limbah kedalamnya, namun penurunan karakteristik



ketahanan korosinya tidak signifikan. Pemakaian baja tahan karat AISI 304 L atau 321 akan memberikan karakteristik ketahanan korosi yang lebih baik, namun pemakaian baja tahan karat jenis ini dirasa tidak ekonomis mengingat harga baja tahan karat AISI 304L dan 321 jauh lebih mahal dari pada baja tahan karat AISI 304.

Diharapkan dengan mengetahui karakteristik ketahanan korosi wadah limbah radioaktif, dapat didisain wadah limbah radioaktif yang tepat dan pemilihan bahan wadah yang tepat pula sehingga wadah limbah radioaktif dapat berfungsi dengan baik sesuai dengan disain yang direncanakan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Anonymous. Siklus Bahan Bakar Nuklir.  
Available:  
[http://www.infonuklir.com/readmore/read/pltn/bahan\\_bakar\\_nuklir/16e0og-1/Siklus%20Bahan%20Bakar%20Nuklir](http://www.infonuklir.com/readmore/read/pltn/bahan_bakar_nuklir/16e0og-1/Siklus%20Bahan%20Bakar%20Nuklir), diakses 10 – 04 – 2010.
- Anonymous. The Recycling of Nuclear Fuel and High Level Radioactive Waste.  
Available  
[http://www.numo.or.jp/en/jigyuu/new\\_eng\\_tab\\_04.html](http://www.numo.or.jp/en/jigyuu/new_eng_tab_04.html), diakses 10 – 04 – 2010.
- IAEA. Management of Reprocessed Uranium Current Status and Future Prospects (Tecdoc Series No. 1529), IAEA, Vienna, 2007.
- JNC. Second Progress Report on Research and Development for the Geological Disposal of HLW in Japan. JNC, Japan, 2000.
- IAEA. Borehole Facilities for Disposal of Radioactive Waste (Safety Standar Series DS 335), IAEA, Vienna, 2005.
- Sucipta, Studi Komparasi Shallow Land Disposal dan Rock Cavern Disposal Serta Aplikasinya Di Indonesia (Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan Dan Teknologi Nuklir, Yogyakarta, 10 Juli 2006), Pusat Teknologi Akselerator Dan Proses Bahan, Badan Tenaga Nuklir Nasional, Yogyakarta, 2007.
- IAEA, "Improved Cement Solidification of Low and Intermediate Level Radioactive Wastes" (Technical Report Series No.350), IAEA,Vienna, 1993.
- IAEA, "Handling and Processing of Radioactive Waste From Nuclear Applications" (Technical Series Report No. 402 A), IAEA,Vienna, 2001.
- Russell S.G., *Commercially Available Low-Level Radioactive And Mixed Waste Treatment Technologies*, Lockheed-Martin Idaho Technologies Company, 1996.
- PTLR, "Laporan Analisis Keselamatan Rev.5", PTLR, Serpong, 2006.
- Pusat Teknologi Limbah Radioaktif. Pengelolaan Limbah,  
Available:  
<http://www.batan.go.id/pltr/08id/?q=node/20>, diakses 12-05-2010.
- IAEA. Long Term Behaviour of Low and Intermediate Level Waste Packages Under Repository Conditions, (Tecdoc Series No.1397), IAEA, Vienna, 2004.
- IAEA. Characterization of Radioactive Waste Form and Packages (Technical Report Series No. 383), IAEA,Vienna, 1997.
- Anonymous. Strategi Pengelolaan Limbah Radioaktif PLTN  
Available:  
[http://www.infonuklir.com/readmore/read/pltn/pengolaan\\_limbah/16eppx-1/Strategi%20Pengelolaan%20Limbah%20Radioaktif%20PLTN](http://www.infonuklir.com/readmore/read/pltn/pengolaan_limbah/16eppx-1/Strategi%20Pengelolaan%20Limbah%20Radioaktif%20PLTN), diakses 15-04-2010.
- Petitjean V, Paul D, Fillet C, Boen R, Veyer C, Flament T. Development of Vitrification Process and Glass Formulation for Nuclear Waste Conditioning, ( WM'02 Conference, February 24-28, 2002), Tucson, 2003.
- Lawrence L., Petkus, James P, Paul JV, Helena, H. A Complete History of The High Level Waste Plant at The West Valley Demonstration Project (WM '03 Conference, February 23-27, 2003), Tucson, 2004.
- Anonymous, "The Recycling of Nuclear Fuel and High Level Radioactive Waste"  
Available  
[http://www.numo.or.jp/en/jigyuu/new\\_eng\\_tab\\_04.html](http://www.numo.or.jp/en/jigyuu/new_eng_tab_04.html), diakses 20 – 05- 2010.
- Nuclear Energy Agency, "Engineered Barrier Systems and the Safety of Deep Geological Repositories," OECD, Paris, 2003.
- Toyota M, Mckinley, IG. Optimization of the Engineered Barrier System, Fabrication and Emplacement for Vitrified HLW of HHLW' 98, Las Vegas, 1998.
- Anonymous, "Nuclear Waste Management"  
Available:  
[http://www.numo.or.jp/en/jigyuu/new\\_eng\\_tab\\_04.html](http://www.numo.or.jp/en/jigyuu/new_eng_tab_04.html), diakses 10 -03- 2010.
- Anonymous, "The Recycling of Nuclear Fuel and High Level Radioactive Waste"  
Available:  
[http://www.corwm.org.uk/Pages/Lnk\\_pages/about\\_us.aspx](http://www.corwm.org.uk/Pages/Lnk_pages/about_us.aspx), diakses 09-05-2010.
- Aisyah, Martono H. Keretakan Gelas-Limbah Dalam Wadah, Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah, 6:1, 2003.
- Aisyah. Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Ketahanan Korosi Baja AISI 304L Sebagai Calon Bahan Wadah Limbah Nuklir (Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Teknologi Pengelolaan Limbah 1, Desember, 1997),

- Pusat Teknologi Pengelolaan Limbah Radioaktif, Serpong, 1998.
- Aisyah, Peranan Titanium Pada Ketahanan Korosi Baja Tahan Karat AISI 321 Sebagai Bahan Wadah Limbah Nuklir (Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Penelitian Dasar Ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, Yogyakarta 23-25 April 1996), Pusat Pengembangan Nuklir Yogyakarta, Yogyakarta, 1997.
- Bahdir J. Optimasi Sifat Lindih Blok Beton 950 liter Hasil Imobilisasi Konsentrat Limbah Cair P2TRR (Hasil Penelitian dan Kegiatan Pengelolaan Limbah Radioaktif Tahun 2003), Pusat Pengembangan Pengelolaan Limbah Radioaktif, Serpong, 2004.
- Bahdir J. Studi Penentuan Standar Kualitas Produk Sementasi Limbah Radioaktif ( Hasil Penelitian Pusat Teknologi Pengolahan Limbah Radioaktif 1996/1997) , Pusat Pengembangan Pengelolaan Limbah Radioaktif, Serpong (1998).
- Raul B. R. Selection of Corrosion Resistant Materials for Nuclear Waste Repositories, *Materials Science and Technology (MS& T)*, , 1-16, 2006.
- Angelini, E., et.all., Instability of Stainless Steel Reference Weights Due To Corrosion Phenomena, *Corrosion Science*, **40:7**, 1139 – 1148 , (1998).
- Matula M, et.all., Intergranular Corrosion of 316L Steel, *Materials Characterization* **46**, 203-210, 2001.