

**TEKNOLOGI PEMBUATAN CERMET  $\text{DUO}_2$  - STEEL UNTUK  
WADAH LIMBAH BAHAN BAKAR BEKAS PWR**

Siti Alimah, Budiarto\*)

**ABSTRAK.**

**TEKNOLOGI PEMBUATAN CERMET  $\text{DUO}_2$  - STEEL UNTUK WADAH LIMBAH BAHAN BAKAR BEKAS PWR.** Kajian teknologi dalam pembuatan *cermet*  $\text{DUO}_2$ -*steel* untuk wadah limbah bahan bakar bekas PWR telah dilakukan. *Cermet* (*Ceramic Metallic*)  $\text{DUO}_2$ -*steel* adalah  $\text{DUO}_2$  (*Depleted Uranium Dioxide*) dan keramik lain yang ditanamkan dalam matriks *steel*. Wadah limbah bahan bakar bekas dari *cermet* ini mempunyai unjuk kerja yang unggul dibanding wadah yang dibuat dari bahan lain. Penambahan partikulat keramik  $\text{DUO}_2$  dapat meningkatkan kapasitas wadah bahan bakar bekas, memperbaiki unjuk kerja penyimpanan dan membuang kelebihan DU (*Depleted Uranium*) yang berpotensi sebagai limbah. Dua teknologi pembuatan *cermet* yaitu penuangan/pengecoran dan metalurgi *powder* (serbuk). Metode penuangan ada 3 yaitu penuangan infusi, penuangan tradisional dan penuangan sentrifugal. Sedangkan metode metalurgi *powder* ada 2 yaitu metode tradisional dan metode baru. *Cermet*  $\text{DUO}_2$ -*steel* telah diproduksi secara tradisional dengan menggunakan metode metalurgi *powder*. Namun demikian pembuatan wadah ini mempunyai persyaratan khusus, yaitu pembuatan benda dengan berat sampai 100 ton, dan metode-metode yang ada belum dapat untuk membuat *cermet* dengan ukuran dan geometri sebesar ini. Metode metalurgi *powder* yang baru, merupakan metode pembuatan *cermet* untuk wadah limbah bahan bakar bekas PWR. Teknik metalurgi *powder* ini mempunyai potensi pembiayaan yang rendah dan kebebasan yang lebih besar dalam disain wadah *cermet* dengan memberikan sifat-sifat yang bervariasi.

**ABSTRACT.**

**$\text{DUO}_2$  - STEEL CERMET MANUFACTURING TECHNOLOGY FOR PWR Spent Nuclear Fuel (SNF) CASKS.** Assessment of  $\text{DUO}_2$  - Steel cermet manufacturing technology for PWR SNF casks has been done.  $\text{DUO}_2$  - Steel cermet consisting of  $\text{DUO}_2$  particulates and other particulates, embedded in a steel matrix. Cermet SNF casks have the potential for superior performance compared with casks constructed of other materials. The addition of  $\text{DUO}_2$  ceramic particulates can increase SNF cask capacity, improve of repository performance and disposal of excess depleted uranium as potential waste. Two sets of cermet manufacturing technologies are casting and powder metallurgy. Three casting methods are infusion casting, traditional casting and centrifugal casting. While for powder metallurgy methods there are traditional method and new method.  $\text{DUO}_2$  - Steel cermet have traditionally been produced by powder metallurgy methods. The production of a cask, however, presents special requirements : the manufacture of an annular object with weights up to 100 tons, and methods are being not to manufacture a cermet of this size and geometri. A new powder metallurgy method, is a method for manufacturing cermet for PWR SNF cask. This powder metallurgy techniques have potentials low costs and provides greater freedom in the design of the cermet cask by allowing variable cermet properties.

---

\*) Staf Bidang Pengembangan Sistem dan Teknologi PLTN - PPEN

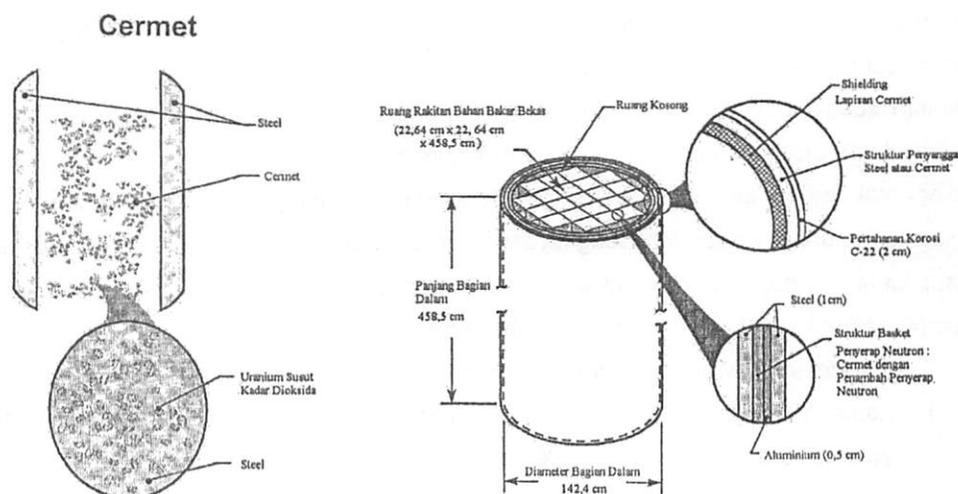
## I. PENDAHULUAN

Salah satu limbah yang dihasilkan dalam pengoperasian pembangkit listrik tenaga nuklir jenis reaktor air bertekanan atau PWR (*Pressure Water Reactor*) adalah bahan bakar bekas. Bahan bakar bekas yang dihasilkan oleh suatu PWR dengan daya 950 MWe adalah sebesar  $37 \text{ m}^3/\text{GWe-tahun}$  [1]. Pada daur terbuka, bahan bakar bekas setelah dikeluarkan dari reaktor, disimpan dalam kolam di reaktor dan selanjutnya disimpan dalam penyimpanan di luar lokasi reaktor, sebelum akhirnya disimpan dalam penyimpanan lestari. Pada penyimpanan lestari ini diperlukan suatu *cask* (wadah) untuk pengepakan bahan bakar bekas. Berdasarkan pada *Nuclear Waste Policy Act of 1982* (NWPAA), disain wadah untuk pengepakan limbah ditentukan dari karakteristik bentuk limbah. Pengepakan limbah ini juga didisain dalam hubungannya dengan *barrier* alami (penghalang fisik alami untuk mencegah migrasi radionuklida) dan *barrier* teknik, sehingga memberikan keselamatan operasi dalam penyimpanan dan transportasi, penggunaan tempat penyimpanan yang efisien dan untuk melindungi opsi pengambilan kembali limbah.

Saat ini disain pengepakan limbah terdiri dari dua kelongsong silinder konsentris, dengan bagian dalam kelongsong dibuat dari *stainless steel* 316 NG yang merupakan penyangga struktur dan bagian luar dibuat dari C-22 (paduan dengan kandungan nikel yang tinggi) yang tahan korosi, untuk menjamin integritas jangka panjang dalam lingkungan penyimpanan [2]. Salah satu bahan lain untuk pengepakan limbah bahan bakar bekas adalah *cermet* uranium susut kadar dioksida ( $\text{DUO}_2$ ) – *steel*, yang saat ini telah diteliti di luar negeri. *Cermet* (*Ceramic Metallic*) adalah keramik yang ditanamkan dalam suatu matriks logam. *Cermet* telah digunakan sebagai bahan bakar nuklir di 11 reaktor penelitian dan reaktor uji pada tahun 1950 [3]. Baru-baru ini di Eropa telah dilakukan penelitian mengenai penggunaan *cermet* sebagai bahan bakar reaktor daya dengan derajat bakar yang sangat tinggi. Namun dalam makalah ini, hanya akan mengkaji teknologi pembuatan *cermet* dari  $\text{DUO}_2$ -*steel* untuk wadah limbah bahan bakar bekas PWR. Karakteristik wadah untuk pengepakan limbah yang dibuat dari *cermet* ini mempunyai unjuk kerja yang unggul dibanding wadah yang dibuat dari bahan lain, yaitu kuantitas bahan bakar bekas per wadah lebih besar dan memberi keuntungan penyimpanan jangka panjang. Penggunaan  $\text{DUO}_2$  sebagai *cermet* selain meningkatkan unjuk kerja wadah untuk pengepakan limbah, juga mengurangi jumlah DU (uranium susut kadar) yang saat ini jumlahnya berlebihan.

## II. WADAH DARI CERMET

Fungsi dari suatu wadah limbah bahan bakar bekas adalah untuk pengepakan bahan bakar bekas, sebagai *shielding* radiasi dan untuk proteksi fisik. Gambar 1 memperlihatkan wadah limbah bahan bakar bekas PWR dari *cermet*  $\text{DUO}_2$  dan partikel-partikel lain yang ditanam dalam matriks *steel* (diantara dua lapisan *clean steel*).



Gambar 1. Penggunaan Cermet untuk Wadah Limbah Bahan Bakar Bekas PWR [3].

## II.1. Sifat-Sifat Cermet

Karakteristik dasar dari *cermet* yaitu pengkapsulan dari partikel keramik yang berbeda, sehingga akan menjadikan matriks logam mempunyai integritas yang tinggi [4]. *Cermet* dari  $\text{DUO}_2$ -*steel* ini mempunyai unjuk kerja yang lebih tinggi dibanding wadah limbah yang dibuat dari material lain. Dalam bentuk *cermet*, sifat-sifat  $\text{DUO}_2$  akan berubah, kekuatan mekanik dan *ductility* (kerapuhan) akan bertambah dan permukaan lebih bersih (tidak terkontaminasi). *Cermet* juga merupakan *shielding* gamma yang lebih baik dari pada *steel* karena  $\text{DUO}_2$  mempunyai densitas lebih tinggi ( $10,9 \text{ gr/cm}^3$ ) dari pada *steel* ( $7,86 \text{ gr/cm}^3$ ). Selain itu, *cermet* merupakan *shielding* neutron yang lebih baik dari pada *steel* dan dapat menyerap neutron sebagaimana gadolinium oksida menyerap neutron thermal. *Cermet* juga mempunyai konduktivitas thermal yang tinggi sehingga dapat diterima sebagai wadah untuk penyimpanan limbah. Kriteria lain dari material *cermet* yaitu :

1. Tidak bereaksi kimia seperti logam uranium.
2. Tidak memberikan dampak yang merugikan terhadap unjuk kerja penyimpanan seperti beton atau organik.
3. Biaya material tidak tinggi seperti tungsten.
4. Bukan logam dari sumber daya alam yang dilindungi dan bukan logam *recovery* (hasil pemungutan kembali), seperti timah.

Karena sifat-sifat tersebut di atas maka penggunaan *cermet* sebagai wadah limbah bahan bakar bekas akan memberikan keuntungan dalam penyimpanan jangka panjang yaitu kontrol kritikalitas nuklir dan pengurangan kecepatan pelepasan radionuklida.

Wadah bahan bakar bekas dari *cermet* ini dimaksudkan untuk penyimpanan lestari di *Yucca Mountain* (calon tempat penyimpanan lestari limbah aktivitas tinggi dan bahan bakar bekas di Nevada), yang mengandung 10 ton bahan bakar dan 50 ton uranium susut kadar (*Depleted Uranium*) [5]. Seperti diketahui bahwa uranium susut kadar adalah produk samping dari proses pengkayaan uranium pada pembuatan bahan bakar untuk reaktor air ringan. Proses pengkayaan menghasilkan 5 sampai 7 ton uranium susut kadar untuk setiap ton pengkayaan uranium bahan bakar, selanjutnya uranium susut kadar ini dapat dimanfaatkan untuk konstruksi wadah. Seperti diketahui bahwa produk uranium susut kadar saat ini jumlahnya berlebihan.

*Cermet* untuk wadah limbah bahan bakar bekas terdiri dari 3 lapisan, yaitu :

1. Lapisan dibagian dalam adalah *cermet* dengan kandungan  $\text{DUO}_2$  rata-rata 50% volume, 0,2% berat U-235, 1% volume  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  dan 49% volume 316 SS. Pusat dari *cermet* dapat mempunyai kandungan  $\text{DUO}_2$  lebih tinggi, tetapi karena dilapisi *steel* maka rata-rata kandungan  $\text{DUO}_2$  adalah 50% volume.
2. Lapisan dibagian tengah  
*Cermet* memberikan *shielding* neutron, tapi kemampuan *shielding* neutron tidak sebagus kemampuan *shielding* gamma. Oleh karena itu, suatu penambahan *shielding* neutron dibagian tengah mungkin diperlukan, tergantung sasaran disain. Jika diperlukan, suatu material *shielding* neutron yang dapat digunakan adalah grafit dengan 1% berat boron. Grafit memberikan tambahan moderasi neutron untuk melambatkan neutron dan selanjutnya menangkapnya.
3. Lapisan dibagian luar adalah C-22 dengan ketebalan 2 cm.

Hasil perhitungan *shielding* radiasi diperlihatkan dalam Tabel 1.

## II.2. Teknologi Pembuatan Cermet Untuk Wadah Limbah Bahan Bakar Bekas

Teknologi pembuatan *cermet* ada dua yaitu metode penuangan dan metode metalurgi *powder*. Ada 3 persyaratan yang diperlukan pada metode penuangan yaitu partikulat keramik tidak bereaksi kimia dengan logam, partikulat keramik tidak melebur atau tidak larut dalam logam leburan dan logam leburan harus membasahi keramik [6]. Metode penuangan ini mempunyai 3 teknik, yaitu penuangan infusi, penuangan tradisional dan penuangan sentrifugal. Pada penuangan infusi, cetakan wadah diisi dengan partikulat  $\text{DUO}_2$ , kemudian logam leburan dimasukkan ke *bed* partikulat keramik pada kondisi hampa udara. Teknik ini digunakan untuk barang yang kecil dan belum jelas digunakan untuk barang yang besar seperti wadah limbah bahan bakar bekas. Pada penuangan tradisional, partikulat  $\text{DUO}_2$  ditambahkan ke *steel* leburan dan hasil dispersi dituangkan ke cetakan yang stasioner.  $\text{DUO}_2$  akan cenderung ke dasar cetakan, karena  $\text{DUO}_2$  mempunyai densitas yang lebih besar daripada *steel*. Namun ini dapat dicegah dengan 2 cara yaitu dengan kontrol temperatur *slurry* dan kontrol ukuran partikulat  $\text{DUO}_2$  sehingga uniform dengan *steel*. Meskipun teknik ini lebih sederhana, metode pembuatan

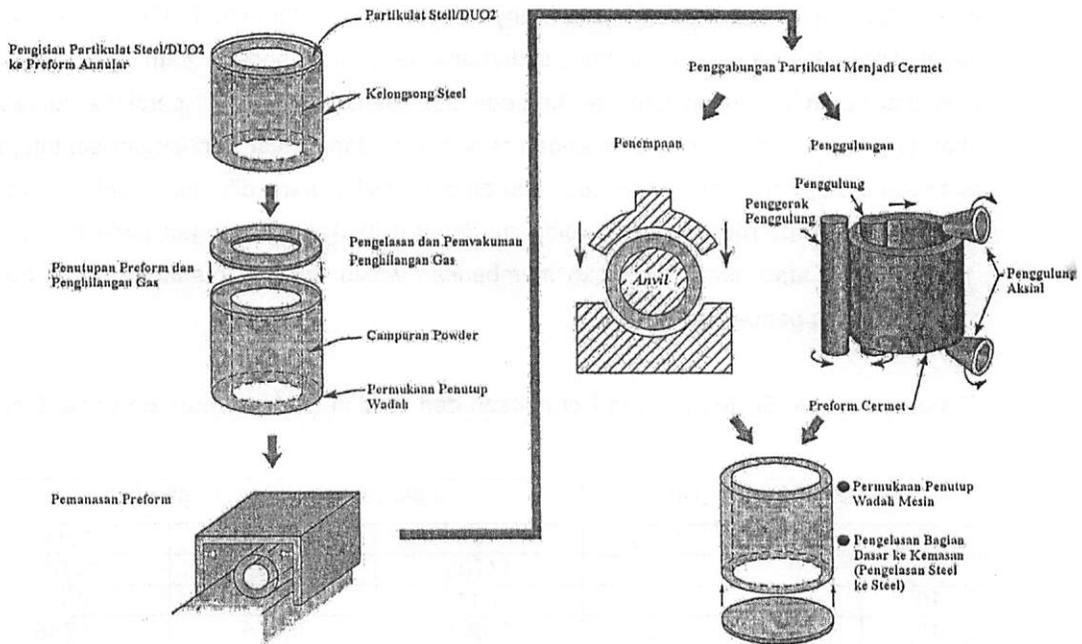
ini mempunyai 2 keterbatasan yaitu hanya perbandingan tertentu  $DUO_2$  - steel yang dapat diproduksi dan hanya *cermet* sederhana yang mengandung satu keramik. Jika partikulat keramik dengan densitas berbeda ditambahkan ke *slurry*, partikulat tersebut akan terpisah dalam operasi penuangan tersebut. Sedang pada penuangan sentrifugal, partikulat  $DUO_2$  ditambahkan ke *steel* leburan dan hasil dispersi dituang ke cetakan yang dirotasi pada ~400 rpm. Pada teknologi ini dapat dilakukan penuangan pada beberapa lapisan logam atau *cermet*, dengan memberikan waktu untuk pemadatan logam pada masing-masing penuangan.

Tabel 1. Radiasi Eksternal pada Permukaan dari Wadah Limbah untuk Berbagai Disain [3].

Material Shielding (cm)			Tingkat Radiasi Permukaan (R/h)		
Cermet	Grafit	C-22	$\gamma$	n	Total
0	0	0	14700	3,18	14703
10	0	2	1,11	1,12	2,23
15	0	2	0,063	0,675	0,738
20	0	2	0,00596	0,401	0,407
25	0	2	0,00159	0,236	0,238
25	10	2	0,00137	0,0419	0,0433
25	15	2	0,000923	0,0179	0,0188
25	20	2	0,000573	0,00776	0,00833
25	25	2	0,000340	0,00343	0,00377
25	30	2	0,000198	0,00154	0,00174

Teknologi pembuatan *cermet* dengan metalurgi *powder* ada 2 yaitu metode tradisional dan metode baru. Metode metalurgi *powder* tradisional meliputi : pencampuran *powder* logam dan partikulat keramik, penutupan campuran dengan kotak logam yang cocok, pemanasan campuran bersamaan proses penghilangan gas diantara partikulat dalam keadaan hampa udara, kompresi kotak dan campuran pada temperatur tinggi untuk menghasilkan matriks plat logam monolitik. Namun produksi wadah limbah bahan bakar bekas mempunyai persyaratan khusus yaitu membuat suatu benda *annular* dengan berat sampai 100 ton, dan metode-metode tersebut belum dapat untuk membuat *cermet* dengan ukuran dan geometri ini. Teknologi metalurgi *powder* yang baru adalah metode pembuatan *cermet* untuk wadah limbah bahan bakar bekas, seperti terlihat dalam Gambar 2. Metode metalurgi *powder* yang baru terdiri dari beberapa langkah yaitu :

- Pembuatan *preform*. *Preform* merupakan suatu kelongsong yang ukurannya sedikit lebih besar dari *body* wadah dengan bentuk *annular*, dikonstruksi dari *steel* dan merupakan lapisan bagian dalam dan bagian luar dari wadah. *Preform* terdiri dari bagian dalam, bagian luar dan permukaan paling atas dari *body* wadah.



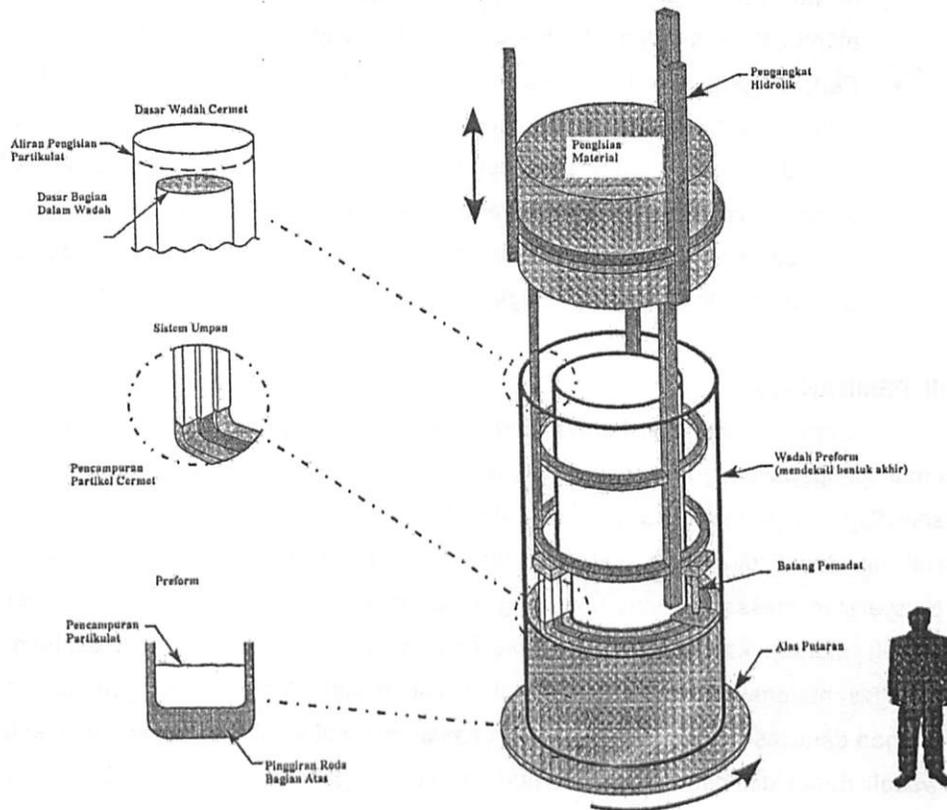
Gambar 2. Pembuatan Wadah Limbah Bahan Bakar Bekas dari  $DUO_2$  - Steel dengan Metode Metalurgi Powder [7].

- Pengisian *preform*. *Preform* diisi dengan campuran partikulat  $DUO_2$ , keramik lain dan *powder steel*. Secara skematik proses pengisian dapat dilihat dalam Gambar 3. *Preform* wadah dibalik, ditempatkan pada meja yang dapat berputar. Bagian depan dari mesin pengisi (untuk distribusi partikulat) direndahkan ke dasar *preform*.

Sebagaimana perputaran meja, mesin pengisi :

1. Mencampur partikulat umpan (partikulat steel dan keramik) ke *preform* secara berlapis, kontinyu.
2. Mengkompaksi masing-masing lapisan.
3. Mengambil lapisan partikulat secara spiral kontinyu dari dasar *preform* ke bagian paling atas, seperti pengisian *preform*.

Beberapa perputaran diperlukan untuk mengisi *preform*. Penggunaan *nozzle* (pipa semprot) umpan untuk partikulat memungkinkan untuk memvariasi komposisi dari lapisan individu dari *preform* wadah bagian dalam ke bagian luar. Komposisi dari campuran partikulat dapat juga divariasi dalam arah vertikal. Disain ini mengikuti mesin pengisi yang memvariasi komposisi partikulat sepanjang *preform*.



Gambar 3. Proses Pengisian *Preform Cermet* dengan Partikulat  $DuO_2$ , Keramik Lain dan *Powder Steel* [7].

Kompaksi bertujuan untuk menjamin tidak adanya perpindahan dari partikulat ini selama operasi penanganan berikutnya.

- Penggabungan, Pemanasan dan Pengosongan Gas. Setelah *preform* diisi, suatu *ring annular* dilas ke *preform* untuk pembebanan, sehingga memperkuat *preform annular*. Kemudian *preform* dipanasi dan saat dipanasi dilakukan penghilangan gas dalam ruang-ruang kosong di dalam campuran partikulat dengan cara penyerapan.
- Penempaan, prosesnya meliputi pemanasan dan kompresi. Pada proses ini terjadi juga :
  1. Penghilangan semua ruang-ruang kosong.
  2. Penggabungan partikel-partikel logam sehingga membentuk matriks *steel* yang kuat yang mengandung berbagai partikulat keramik.

Kompresi dilakukan pada temperatur tinggi untuk meminimumkan tenaga yang diperlukan untuk penghilangan semua gas dalam ruang-ruang kosong di dalam campuran partikulat dan mempercepat penggabungan partikulat *steel* menjadi matriks padat yaitu dengan proses difusi. Temperatur penempaan dilakukan di

bawah titik lebur logam. Teknik ini adalah teknik metalurgi *powder* untuk membuat *cermet* dengan komposisi yang bervariasi.

- Penyempurnaan yaitu dengan pengelasan dasar wadah ke *body* wadah yang silindris. Setelah langkah ini selesai, dilakukan pengeboran lubang di bagian atas dari wadah untuk baut penutup. Tebal *preform steel* di pusat wadah 1 sampai 2 cm, tebal *preform* dekat penutup 10 sampai 20 cm untuk tempat lubang baut dan alat pelengkap dari *hardware* yang lain. Semua pengelasan dan operasi dengan mesin dilakukan di bagian *preform*, bukan pada bagian dalam *cermet*.

### III. PEMBAHASAN

Seperti disebutkan bahwa fungsi dari wadah limbah bahan bakar bekas selain untuk pengepakan, juga sebagai *shielding* radiasi dan untuk proteksi fisik. Sebagai *shielding* radiasi maka wadah tersebut harus memenuhi persyaratan *shielding* radiasi. Hal ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Persyaratan *shielding* didefinisikan dari persyaratan massa per luas unit yang dapat menghentikan radiasi gamma. Jadi berat wadah menentukan persyaratan *shielding* radiasi. Berat wadah tergantung pada densitas material. Berat wadah dapat diminimumkan dengan menggunakan material dengan densitas tinggi. Dengan menggunakan material wadah densitas tinggi, ketebalan wadah dapat diminimumkan. Densitas *cermet* dengan kandungan  $\text{DUO}_2$  50% volume adalah  $9,44 \text{ g/cm}^3$  dan  $10,66 \text{ g/cm}^3$  untuk kandungan  $\text{DUO}_2$  90%. Perlu juga diketahui, bahwa kapasitas dari wadah bahan bakar bekas biasanya dibatasi berat karena fasilitas penanganan di reaktor membatasi berat wadah sampai 100 ton. Jika berat wadah dapat dikurangi, jumlah rakitan bahan bakar bekas per wadah dapat ditingkatkan untuk berat wadah yang sama. Jadi penggunaan  $\text{DUO}_2$  akan memaksimalkan efisiensi *shielding* dan dengan peningkatan efisiensi ini akan memaksimalkan kapasitas wadah dan lebih ekonomis. Tebal dinding wadah selain dikontrol oleh persyaratan *shielding* gamma, juga dikontrol oleh *shielding* neutron. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 1. Seperti disebutkan bahwa material densitas tinggi meminimumkan ketebalan dinding wadah untuk *shielding* gamma, namun jenis-jenis material yang lain diperlukan juga untuk penambahan *shielding* neutron. Dengan adanya moderasi dan kemudian penangkapan neutron, maka penggunaan aditif lain seperti grafit dalam *cermet* akan meningkatkan *shielding* neutron, meskipun dalam keramik  $\text{DUO}_2$  sendiri terdapat oksigen dengan densitas tinggi ( $1,3 \text{ g/cm}^3$ ) yang dapat membantu moderasi neutron. Sebagai *shielding* neutron, kelebihan lain dari grafit dibanding keramik adalah berat grafit lebih rendah dari pada *cermet*. Dengan diminimumkannya ketebalan dinding maka berat juga berkurang, biaya pembuatan akan lebih murah. Dengan pengurangan berat maka akan mengurangi kesulitan dalam penanganan dan transportasi.

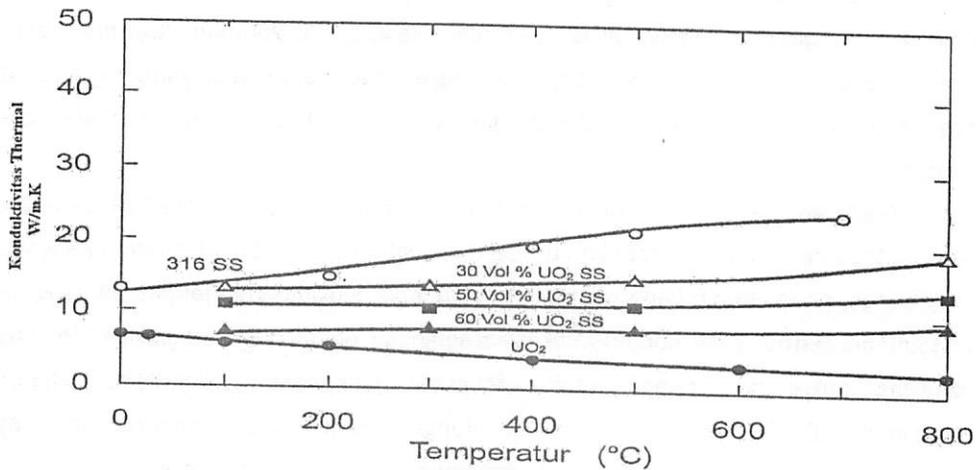
Seperti disebutkan sebelumnya, *cermet* mempunyai konduktivitas thermal yang tinggi. Sebagai material keramik,  $\text{DUO}_2$  mempunyai konduktivitas thermal lebih rendah

dari logam pasangannya dalam *cermet*. Konduktivitas thermal *cermet* berada diantara harga konduktivitas thermal  $DUO_2$  dan fase logam, seperti terlihat dalam Gambar 4.  $DUO_2$  mempunyai kuat tarik yang lebih rendah dari *steel*, kuat tarik *cermet* menurun jika konsentrasi  $DUO_2$  meningkat. Kuat tarik dari *cermet* ada diantara kuat tarik  $DUO_2$  dan *steel*, seperti terlihat dalam Gambar 5. Dalam aplikasi wadah bahan bakar bekas, *cermet* berada diantara lapisan *clean steel*. Bagian yang paling kuat dari struktur komposit adalah daerah *clean steel* di permukaan luar. Bagian yang paling lemah dari struktur komposit adalah *cermet* di tengah struktur komposit. Dilihat dari struktur tersebut, konstruksi ini akan memaksimalkan kekuatan secara keseluruhan. *Cermet* adalah material yang kuat dan keras yang dapat beroperasi pada temperatur yang tinggi. Unjuk kerja yang paling baik ini bahkan dapat dilihat jika terjadi kecelakaan, kebakaran atau sabotase.

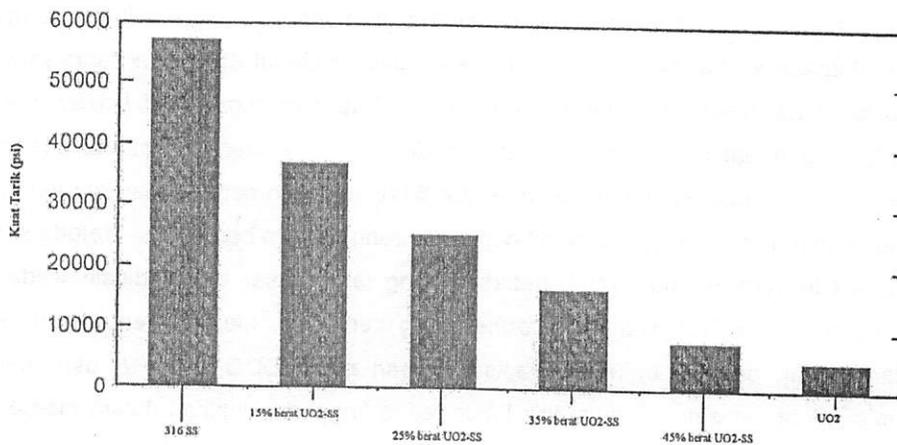
Pada aplikasi penyimpanan limbah bahan bakar bekas, *cermet*  $DUO_2$  adalah suatu metode dengan menambahkan uranium susut kadar (*Depleted Uranium*) ke wadah untuk pengepakan limbah yang memberi keuntungan penyimpanan jangka panjang dari penggunaan *cermet* yaitu kontrol kritikalitas sehingga dapat meminimumkan terjadinya kritikalitas nuklir dan pengurangan kecepatan pelepasan radionuklida. Dengan penggunaan  $DUO_2$  akan memberi keuntungan juga pada pengurangan biaya pembuangan uranium susut kadar yang jumlahnya saat ini sudah berlebihan.

Kelangsungan ekonomi dari wadah *cermet* tergantung pada biaya pembuatan. Jika biaya pembuatan relatif rendah, wadah *cermet* merupakan teknologi wadah yang unggul. Dari penelitian yang telah dilakukan di luar negeri, teknologi pembuatan wadah dengan metode metalurgi *powder* yang baru mempunyai potensi dengan pembiayaan yang rendah [6]. Biaya pembelian material dan fabrikasi untuk wadah konvensional diperkirakan sekitar \$6B. Biaya untuk pembelian material dan untuk fabrikasi kontainer bahan bakar bekas dan limbah aktivitas tinggi dengan *engineered barrier* (penghalang fisik yang dapat menghambat migrasi radionuklida ke luar dari bahan struktur) pada penyimpanan geologi diperkirakan sekitar \$14B. Dengan penggunaan *cermet* dari  $DUO_2$  - *steel* diperkirakan biaya tersebut dapat dikurangi secara berarti [8]. Metode pembuatan *cermet* ini juga mempunyai kebebasan yang lebih besar dalam disain wadah *cermet* dengan memberikan sifat-sifat *cermet* yang bervariasi. Metode penuangan sentrifugal dari wadah dengan beberapa lapisan (*clean steel*,  $DUO_2$  *cermet*, dst) memerlukan lapisan luar yang mempunyai titik lebur paling tinggi dan lapisan dalam mempunyai titik lebur paling rendah. Efek grafitasi dari operasi penuangan menghasilkan pengendapan dari  $DUO_2$  yang *dense* (pekat) dalam *steel* leburan sehingga membatasi perbandingan volume dari keramik terhadap logam. Metode penuangan juga memerlukan volume peralatan yang lebih besar untuk kontak dengan  $DUO_2$  sehingga akan membangkitkan limbah yang cukup berarti. Tetapi opsi penuangan dapat menggunakan kembali logam daur ulang yang terkontaminasi sehingga terjadi penghematan biaya material dan

pembuangan. Jika daur ulang digunakan, penggunaan langkah-langkah metalurgi, *furnace* elektrik dan beberapa peralatan proses diperlukan untuk menghasilkan *powder* logam. Jadi ekonomi dari metode penguangan ini sangat tergantung pada proses awal sampai akhir. Selain itu produksi wadah limbah bahan bakar bekas mempunyai persyaratan khusus yaitu membuat suatu benda *annular* dengan berat sampai 100 ton, dan metode ini belum dapat untuk membuat *cermet* dengan ukuran dan geometri tersebut.



Gambar 4. Konduktivitas Thermal dari *Cermet* dan Material Lain sebagai Fungsi Temperatur [3].



Gambar 5. Kuat Tarik *Cermet* dan Material Lain [3].

#### IV. KESIMPULAN

Ada 2 teknologi pembuatan *cermet*  $DUO_2$ -*steel* yaitu penuangan dan metalurgi *powder*. Saat ini metode penuangan belum diaplikasikan untuk pembuatan wadah limbah bahan bakar bekas. Metode metalurgi *powder* yang baru, merupakan metode pembuatan cermet untuk wadah limbah bahan bakar bekas PWR yang mempunyai potensi pembiayaan yang rendah dan memberikan kebebasan dalam disain wadah *cermet* dengan sifat-sifat yang bervariasi. Penggunaan  $DUO_2$  ini, memperbaiki unjuk kerja penyimpanan yaitu memaksimalkan efisiensi *shielding* dan memaksimalkan kapasitas wadah, memberi keuntungan penyimpanan jangka panjang yaitu kontrol kritikalitas dan pengurangan kecepatan pelepasan radionuklida serta membuang kelebihan DU (*Depleted Uranium*) yang berpotensi sebagai limbah.

#### V. PUSTAKA

1. WON II KO, HO DONG KIM AND MYUNG SEUNG YANG, "Radioactive Waste Arisings from Various Fuel Cycle Option", Journal of Nuclear Science and Technology, Vol.39, No.2, February 2002.
2. \_\_\_\_\_ "Description of The Waste Form and Packaging", [http://www.ocrwm.doe.gov/documents/ser\\_b/main3.htm](http://www.ocrwm.doe.gov/documents/ser_b/main3.htm).
3. FORSBERG, C.W., et.al., "Cermet Transport, Storage and Disposal Packages Using Depleted Uranium Dioxide and Steel", 13<sup>th</sup> International Symposium on The Packaging and Transport of Radioactive Materials, Institute of Nuclear Materials Management, Chichago, Illinois, 2001.
4. FORSBERG, C.W., "Cermet Waste Packages Using Depleted Uranium Dioxide and Steel", 9<sup>th</sup> International High-Level Radioactive Waste Management Conference, Las Vegas, Nevada, 2001.
5. FORSBERG C.W. and LES'R. DOLE, "An Integrated Once-Through Fuel Cycle with Depleted Uranium Dioxide SNF Multifunction Casks", Advances in Nuclear Fuel Cycle Management III Conference, Hilton Head Island, South Carolina, 2003.
6. FORSBERG C.W. and SIKKA V.K., "Alternative Manufacturing Method for Depleted Uranium Dioxide-Steel cermet SNF Casks", 2003 International High-Level Radioactive Waste Management Conference, American Nuclear Society, Las Vegas Nevada, 2003.
7. FORSBERG C.W., "A New Method for Manufacturing Depleted Uranium Dioxide-Steel Cermet Casks for Spent Nuclear Fuel and Radioactive Wastes", Depleted Uranium uses Conference Oak Ridge, Tennessee, 2004.
8. HAIRE M.J., CROFF A.G., "Cost-Effectiveness of Utilizing Surplus Depleted Uranium (DU)", WM '04 Conference, Tennessee, 2004.