

ISSN 0852-2979

PROSIDING

HASIL PENELITIAN DAN KEGIATAN PUSAT TEKNOLOGI LIMBAH RADIOAKTIF TAHUN 2013



Diterbitkan Tanggal 1 September 2014



**PUSAT TEKNOLOGI LIMBAH RADIOAKTIF
BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL**

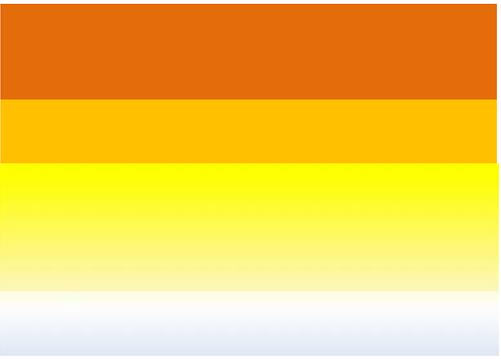


PLR PEDULI



**PUSAT TEKNOLOGI LIMBAH RADIOAKTIF
BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL**

**Gedung 50 Kawasan PUSPIPTEK Serpong
www.batan.go.id/ptlr**



batan

**HASIL PENELITIAN DAN KEGIATAN
PUSAT TEKNOLOGI LIMBAH RADIOAKTIF
TAHUN 2013**

2014

PENYIMPANAN BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS PLTN 1000 MWe SISTEM KERING CASK STORAGE

Subiarto, Cahyo Hari Utomo, Dwi Luhur Ibnu Saputra
Pusat Teknologi Limbah Radioaktif-BATAN

ABSTRAK

PENYIMPANAN BAHAN BAKAR NUKLIR BEKAS PLTN 1000 Mwe SISTEM KERING CASK STORAGE. Telah dilakukan pengkajian tentang penyimpanan bahan bakar nuklir bekas (BBNB) dari PLTN 1000 Mwe dengan sistem kering *cask storage*. Jumlah BBNB yang ditimbulkan dari pengoperasian PLTN 1000 Mwe adalah sebanyak 64 bundel per 18 bulan atau 29,805 MtU per 18 bulan. Setelah disimpan dalam kolam air (*wet storage*) selama 3-5 tahun, BBNB kemudian dipindahkan ke tempat penyimpanan kering untuk jangka waktu yang lebih lama. Ada banyak metoda penyimpanan kering, salah satunya adalah *dry cask storage* yang akan dikaji dalam pengkajian dan penelaahan ini. *Dry cask storage* telah lazim digunakan sebagai tempat penyimpanan BBNB di negara-negara yang telah mengoperasikan PLTN dan selama ini operasi penyimpanan BBNB telah berlangsung dengan baik selama puluhan tahun tanpa kendala yang berarti.

Kata Kunci : Bahan Bakar Nuklir Bekas (BBNB), PLTN 1000 Mwe, *Dry Cask Storage*.

ABSTRACT

STORAGE OF NPP's 1000 MWe SPENT NUCLEAR FUEL WITH DRY CASK STORAGE SYSTEM. Assesment about storage of spent nuclear fuel (SNF) from Nuclear Power Plant (NPP)'s 1000 MWe with dry cask storage system have been done. The amount of spent nuclear fuel inflicted from operation of NPP 1000 MWe was as much as 64 bundles per 18 months or 29.805 MtU per 18 months. After being stored in a pool of water (*wet storage*) for 3-5 years, spent nuclear fuel then transferred to dry storage for longer periods of time. There were many methods of dry storage system, one was the dry cask storage which will be examined in this assessment and review. Dry cask storage has been customarily used as storage of spent nuclear fuel in countries that have been operating NPP's and this spent nuclear storage operation has been ongoing well for decades without the constraints of meaning.

Keywords : Spent nuclear fuel (SNF), NPP 1000 MWe, Dry cask storage.

PENDAHULUAN

Operasi PLTN menimbulkan bahan bakar nuklir bekas (BBNB). Untuk menjamin keselamatan pekerja dan masyarakat serta lingkungan, BBNB ini harus dikelola dengan tepat. Setelah disimpan dalam kolam reaktor selama periode waktu sekitar 5 tahun, selanjutnya BBNB disimpan dalam fasilitas penyimpanan sistem kering. Ada beberapa macam fasilitas penyimpanan sistem kering ini, salah satunya sistem *cask storage* yang akan dibahas dalam pengkajian ini.

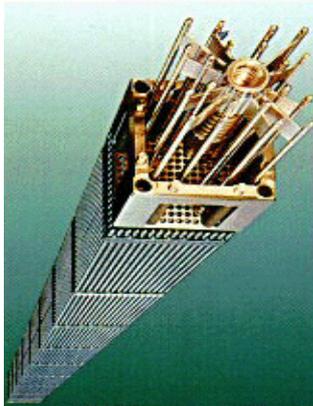
Indonesia direncanakan akan membangun beberapa PLTN tipe PWR (*Pressurized Water Reactor*) dengan kapasitas masing-masing 1000 MWe (*Mega Watt electric*). Kondisi saat ini, Indonesia belum memiliki PLTN, sehingga BBNB yang ditimbulkannya berasal dari ke-3 reaktor penelitian yang ada di Serpong, Bandung dan Yogyakarta dengan dimensi yang berbeda dari BBNB reaktor PLTN.

Tanggung-jawab PTLR-BATAN saat ini adalah mengelola BBNB dari reaktor di Serpong dengan aman dan selamat. Ke depan, dengan beroperasinya PLTN, maka PTLR juga harus sudah siap mengelola BBNB dari PLTN tersebut.

Sebagaimana tertuang dalam Kebijakan Energi Nasional (KEN) 2003 – 2020 yang telah disusun oleh Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), pemenuhan kebutuhan listrik nasional dilakukan melalui diversifikasi pembangkitan listrik. Salah satu pilihan pembangkitan energi listrik yang akan dibangun adalah PLTN.

Adanya rencana memasukkan energi nuklir dalam sistem pemasok energi nasional melalui pembangunan PLTN tersebut maka akan mulailah era industri nuklir di Indonesia. Guna menghadapi pengelolaan bahan bakar nuklir bekas dalam waktu dekat maupun dalam jangka panjang, untuk reaktor pembangkit daya listrik, maka perlu dipelajari perkembangan teknologi pengelolaan bahan bakar nuklir bekas.

Bahan bakar nuklir bekas (BBNB) adalah bahan bakar nuklir yang telah selesai digunakan untuk menghasilkan energi listrik dalam operasi PLTN, biasanya berbentuk perangkat bahan bakar (*fuel assembly*). Bahan bakar nuklir umumnya dipakai di dalam PLTN selama beberapa tahun sebelum kehilangan kemampuan untuk menghasilkan energi. Saat PLTN beroperasi proses pembelahan inti berlangsung, energi dilepaskan dan di dalam bahan bakar terbentuk produk fisi dan aktinida hasil aktivasi. Umumnya BBNB kelihatan sama persis seperti ketika pertama kali dimasukkan ke dalam reaktor [1] Gambar 1 memperlihatkan contoh perangkat bahan bakar nuklir PWR.



Assembly : 17x17
Berat uranium : 461,4 kg
Berat UO_2 : 523,4 kg
Berat perangkat : 657,9 kg
Berat logam : 134,5 kg

Gambar 1. Contoh Perangkat Bahan Bakar PWR [2]

BBNB dalam pengelolaannya tergantung pada opsi siklus daur bahan bakar nuklir yang dianut negara bersangkutan. Ada dua macam siklus bahan bakar nuklir (BBN), yaitu siklus BBN terbuka dan siklus BBN tertutup. Pada awal industri PLTN asumsi yang diterima dalam pengelolaan adalah BBNB akan diolah ulang, uranium dan plutonium digunakan kembali sebagai bahan bakar nuklir (disebut siklus BBN tertutup). Situasi ini muncul sebagai konsekuensi atas perkiraan besar terhadap pertumbuhan program PLTN dan

kurangnya ketersediaan uranium. Namun demikian perubahan pertumbuhan PLTN, penemuan sumber-sumber uranium baru dan penggunaan material dapat belah dari senjata nuklir membuat program olah ulang BBNB tidak berkembang. Teknologi olah ulang tersedia dan teruji, beberapa negara telah memutuskan untuk mengimplementasikannya dalam program PLTN mereka. Beberapa negara atau pengguna listrik menganggap lebih menguntungkan untuk mengimplementasikan siklus terbuka, dimana BBNB yang dikeluarkan dari teras reaktor disimpan, setelah jangka waktu tertentu BBNB akan dikondisioning dan dibuang langsung ke fasilitas *repository* pada formasi geologi. Kedua pendekatan siklus terbuka dan tertutup masing-masing mempunyai kelebihan dan kekurangan.

Pada makalah ini dilakukan pengkajian penyimpanan BBNB dengan metoda sistem kering *dry cask storage*, dengan tujuan mendapatkan data dan spesifikasi dry cask storage untuk tempat penyimpanan BBNB sebelum langkah berikutnya dilakukan, yakni olah-ulang atau penyimpanan lestari di formasi geologi dalam.

DATA DAN PEMBAHASAN

BBNB dari PLTN 1000 MWe

Bahan bakar nuklir bekas adalah limbah radioaktif padat aktivitas tinggi, jumlah BBNB yang ditimbulkan dari pengoperasian PLTN 1.000 MWe sebanyak 64 bundel per 18 bulan atau 29,805 MtU per 18 bulan seperti ditunjukkan Tabel 1. Pada tabel tersebut PLTN diasumsikan beroperasi pada awal tahun 2020, pemuatan pertama bahan bakar segar (*fresh fuel/FF*) adalah 89,4 MtU, kemudian setelah iradiasi selama 18 bulan sebanyak 29,805 MtU menjadi bahan bakar nuklir bekas (*spent nuclear fuel/SNF*) [3].

Tabel 1. Jumlah Limbah BBNB yang Dihasilkan oleh Reaktor PLTN 1000 MWe [3]

Tahun	JUMLAH BAHAN BAKAR (MIU)									
	REAKTOR-1		REAKTOR-2		REAKTOR-3		REAKTOR-4		ALL REAKTOR	
	FF	SNF	FF	SNF	FF	SNF	FF	SNF	MT FF	SNF
2020	89,4	0	0	0	0	0	0	0	89,4	0
2021	19,87	29,805	89,4	0	0	0	0	0	109,27	29,805
2022	19,87	29,805	19,87	29,805	0	0	0	0	39,74	59,61
2023	19,87	0	19,87	29,805	0	0	0	0	39,74	29,805
2024	19,87	29,805	19,87	0	0	0	0	0	39,74	29,805
2025	19,87	29,805	19,87	29,805	0	0	0	0	39,74	59,61
2026	19,87	0	19,87	29,805	0	0	0	0	39,74	29,805
2027	19,87	29,805	19,87	0	89,4	0	0	0	129,14	29,805
2029	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	89,4	0	149,01	89,415
2030	19,87	0	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	79,48	89,415
2031	19,87	29,805	19,87	0	19,87	0	19,87	29,805	79,48	59,61
2032	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	0	79,48	89,415
2033	19,87	0	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	79,48	89,415
2034	19,87	29,805	19,87	0	19,87	0	19,87	29,805	79,48	59,61
2035	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	0	79,48	89,415
2036	19,87	0	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	2031	19,87
2037	19,87	29,805	19,87	0	19,87	0	19,87	29,805	2032	19,87
2038	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	0	2033	19,87
2039	19,87	0	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	2034	19,87
2040	19,87	29,805	19,87	0	19,87	0	19,87	29,805	2035	19,87
2041	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	0	2036	19,87
2042	19,87	0	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	2037	19,87
2043	19,87	29,805	19,87	0	19,87	0	19,87	29,805	2038	19,87
2044	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	0	2039	19,87
2045	19,87	0	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	2040	19,87
2046	19,87	29,805	19,87	0	19,87	0	19,87	29,805	2041	19,87
2047	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	0	2042	19,87
2048	19,87	0	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	2043	19,87
2049	19,87	29,805	19,87	0	19,87	0	19,87	29,805	2044	19,87
2050	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	0	2045	19,87
2051	19,87	0	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	2046	19,87
2052	19,87	29,805	19,87	0	19,87	0	19,87	29,805	2047	19,87
2053	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	0	2048	19,87
2054	19,87	0	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	2049	19,87
2055	19,87	29,805	19,87	0	19,87	0	19,87	29,805	2050	19,87
2056	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	0	2051	19,87
2057	19,87	0	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	2052	19,87
2058	19,87	29,805	19,87	0	19,87	0	19,87	29,805	2053	19,87
2059	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	0	2054	19,87
2060	19,87	0	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	2055	19,87
2061	19,87	29,805	19,87	0	19,87	0	19,87	29,805	2056	19,87
2062	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	0	2057	19,87
2063	19,87	0	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	2058	19,87
2064	19,87	29,805	19,87	0	19,87	0	19,87	29,805	2059	19,87
2065	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	29,805	19,87	0	2060	19,87
2020-2065	963,68	894,15	943,61	864,345	824,59	745,125	804,72	715,32	3536,8	3218,94

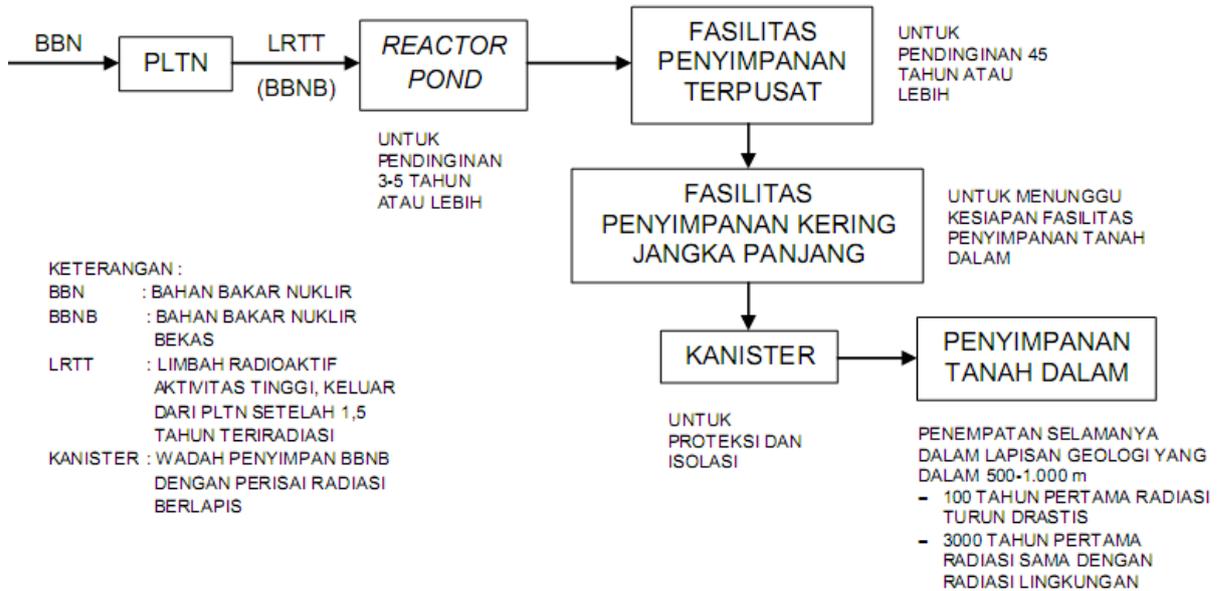
Bahan bakar nuklir PLTN jenis PWR 1.000 MeW mempunyai nilai bakar (*burn up*) dan persen pengayaan U-235 yang bervariasi, seperti ditunjukkan pada Tabel 2. Bahan bakar PLTN yang digunakan mempunyai *burn up* 50.000 MWD/ton U [3].

Tabel 2. Hubungan Nilai Bakar, Persen Pengayaan dan Jumlah Uranium yang Diperkaya dalam Satu Siklus/Catu Bahan Bakar (18 Bulan) [3]

Nilai Bakar (<i>Burn-Up</i>) MWD/ton U	Persen Pengayaan U-235	Ton Uranium Sisa per Siklus (18 bulan)
35.000	3,227 %	42,57
40.000	3,651 %	37,25
45.000	4,079 %	33,11
50.000	4,51 %	29,8
55.000	4,953 %	27,09
60.000	5,398 %	24,83

Fasilitas Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas (FPSBBNB)

Dalam reaktor nuklir, bahan bakar menghasilkan neutron dan panas selama periode operasi. Bahan bakar dikeluarkan dari reaktor bila umur ekonomisnya telah dicapai (berdasarkan desain), bahan bakar tersebut menjadi bahan bakar bekas. Bahan bakar bekas mengandung unsur-unsur radioaktif hasil fisi, elemen transurium dan hasil aktivasi. Bahan bakar tersebut mengeluarkan panas dan radiasi yang ditimbulkan oleh peluruhan unsur-unsur radioaktifnya. Sasaran utama pengelolaan BBNB adalah bahan bakar tersebut harus disimpan secara aman, ekonomis dan memenuhi ketentuan keselamatan terhadap manusia dan lingkungan [4,5]. Bahan bakar nuklir bekas tersebut setelah keluar dari reaktor disimpan dalam kolam penyimpanan (*reactor pond*) selama 3-5 tahun atau lebih untuk peluruhan aktivitas dan panas. Selanjutnya BBNB dipindah ke fasilitas penyimpanan sementara dilokasi PLTN yang mampu menyimpan bahan bakar selama periode panjang 45 tahun atau lebih. Setelah itu BBNB dipindah ke fasilitas penyimpanan lestari. Saat ini pengelolaan BBNB di Indonesia sesuai dengan regulasi yang berlaku menganut sistem bahan bakar nuklir terbuka, pengelolaan BBNB ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Strategi dan Program Pengelolaan Limbah Radioaktif untuk PLTN di Masa yang akan Datang [4,6,7]

Penyimpanan BBNB Sistem Kering

Penyimpanan kering akan lebih baik dari segi kerusakan perangkat BBNB terutama terhadap korosi sehingga BBNB akan tahan lebih lama dalam sistem penyimpanan kering. Pada sistem penyimpanan basah BBNB diharapkan tahan sampai 50 tahun, sedangkan pada sistem kering diharapkan tahan sampai 100 tahun, pendinginan kering dengan udara merupakan pilihan yang lebih baik dari pada pendinginan kolam air. Namun demikian, sistem penyimpanan kering mempunyai kapasitas perpindahan panas yang rendah sehingga tidak dapat digunakan untuk BBNB yang baru keluar dari teras reaktor. Oleh karena itu penyimpanan sistem kering banyak digunakan untuk penyimpanan sementara BBNB di luar lokasi reaktor, *AFR (Away From Reactor)*

Sistem penyimpanan sementara BBNB tipe kering menggunakan udara sebagai media pendingin. Perpindahan panas yang terjadi pada sistem tempat penyimpanan BBNB tipe kering meliputi panas konveksi yang terakumulasi pada dinding, panas tempat penyimpanan yang diambil secara konveksi oleh pendingin melalui pengaliran udara dan laju massa alir yang dibutuhkan oleh udara masuk.

Sistem penyimpanan sementara BBNB tipe kering terbagi dari 4 jenis, yaitu :

1. *Vault Storage*

Struktur fasilitas penyimpanan ini meliputi *shell* beton yang besar dengan rak penyimpanan atau lobang penyimpanan. *Canister* ditumpuk 1 atau 2 tingkat. *Vault Storage* ada dua macam, yaitu yang menggunakan udara pendingin secara konveksi paksa dan konveksi alam. Sebagai perisai adalah beton dan wadahnya (kelongsong bahan bakar dan *canister*). Laju dosis permukaan yang diperkenankan kurang dari 2 mrem/jam pada permukaan gedung. Sebagai pelindung pada *vault storage* dengan konveksi paksa adalah *canister*, kelongsong

dan bangunan, sedangkan untuk konveksi alam adalah *canister* dan kelongsong. BBNB yang disimpan secara *vault storage* telah mengalami pendinginan 5 tahun atau lebih. Untuk menjamin keutuhan BBNB selama penyimpanan maka dilakukan pemantauan temperatur dan temperatur udara pendingin "*cask*". *Vault Storage* secara konveksi paksa telah dioperasikan di Wylfa- Inggris untuk bahan bakar jenis *Magnox* dan di Moderex – Switzerland. *Vault Storage* secara konveksi alam telah dioperasikan di Inggris untuk bahan bakar jenis *LWR (Light Water Reactor)*.

2. *Drywell Storage*

Struktur fasilitas penyimpanan ini meliputi pipa besi baja dan beton, dengan perisai tanah beton dan besi baja. Perlengkapan *drywell* dibatasi oleh pengambilan panas dan kritikalitas. Sebagai pelindung adalah *canister*, kelongsong dan *drywell*. BBNB yang disimpan secara *drywell storage* adalah BBNB yang telah mengalami pendinginan selama 3-5 tahun atau lebih. Untuk menjamin keutuhan BBNB selama penyimpanan maka dilakukan pemantauan temperatur permukaan *canister* dan *drywell*, temperatur dan radioaktivitas udara pendingin dalam *drywell storage* untuk penyimpanan. Penyimpanan dengan metoda *drywell storage* ini sedang diuji coba di USA.

3. *Silo Storage*

Struktur fasilitas penyimpanan ini meliputi silo dan plat besi baja. Diameter dalam silo 1,2–1,6 m dan tinggi 5,5-6,6 m. Bahan perisai adalah beton dan besi baja. Laju dosis yang diperkenankan adalah lebih kecil daripada 2 mrem/jam pada permukaan luar silo. Sebagai pelindung pada penyimpanan adalah *canister*, kelongsong dan *over package* (dengan aliran udara atau tanpa aliran udara) . BBNB yang disimpan secara *silo storage* adalah yang telah mengalami pendinginan selama 5 tahun atau lebih. Untuk menjamin keutuhan BBNB selama penyimpanan, dilakukan pemantauan temperatur *canister* dan radioaktivitas udara dalam silo.

4. *Cask Storage*

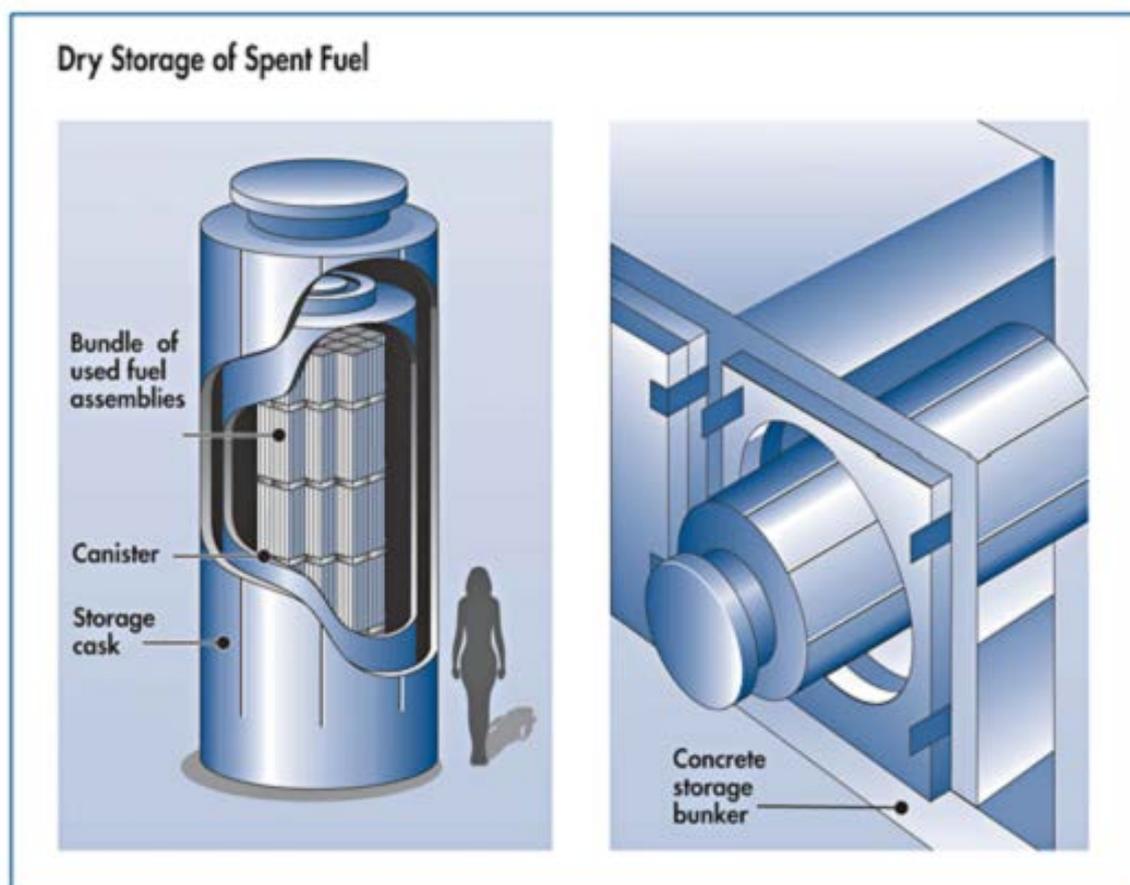
Struktur fasilitas penyimpanan ini meliputi wadah (*cask storage*) dan bangunan penyimpanan dengan struktur "*reinforced cement*". *Cask storage* untuk BBNB jenis *LWR* di USA berukuran diameter luar 2,0-2,5 m, tinggi 6,4-7,0 m dan berat 90-120 ton. Bahan perisai terdiri dari Pb dan bahan perisai netron, besi tuang nodular dan perisai netron. Laju dosis yang diperkenankan adalah 200 mrem/jam pada permukaan *cask* dan 10 mrem/jam pada jarak 1 m dari permukaan *cask*. Sebagai pelindung adalah *cask* dan kelongsong bahan bakar. Bahan bakar yang disimpan secara *cask storage* adalah yang telah mengalami pendinginan selama 5 tahun atau lebih. Untuk menjamin keutuhan BBNB selama penyimpanan, maka dilakukan pemantauan kebocoran *cask*.

Dry Cask Storage

Dry cask storage adalah metode penyimpanan limbah radioaktif tingkat tinggi, seperti bahan bakar nuklir bekas yang telah didinginkan dalam kolam bahan bakar untuk setidaknya satu tahun atau paling lama sepuluh tahun.[8][9] *Casks* adalah biasanya silinder baja yang dilas atau dikunci tertutup. Batang bahan

bakar di dalam dikelilingi oleh gas inert. Idealnya, wadah silinder baja memberikan penangkalan kebocoran bahan bakar yang ketat. Setiap silinder dikelilingi oleh tambahan baja, beton, atau bahan lain untuk memberikan perlindungan terhadap radiasi bagi pekerja dan anggota masyarakat.

Ada berbagai desain sistem *dry cask storage*. Beberapa desain, meletakkan silinder baja yang mengandung bahan bakar secara vertikal dalam beton; desain lainnya mengorientasikan silinder secara horizontal. Kubah beton menyediakan perlindungan terhadap radiasi. Desain *Cask* lainnya mengorientasikan silinder baja secara vertikal pada landasan beton di tempat penyimpanan *dry cask* dan menggunakan genteng beton dan lapisan logam luar silinder untuk perlindungan terhadap radiasi. Saat ini belum ada fasilitas penyimpanan permanen jangka panjang; Penyimpanan *dry cask* dirancang sebagai solusi sementara yang lebih aman dibandingkan penyimpanan bahan bakar bekas dalam kolam. *Cask* yang disimpan secara vertikal dan horizontal bisa dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema *storage cask* yang berisi canister dengan BBNB yang diletakkan secara vertikal (kiri) dan horizontal (kanan). [10]

Pengalaman Negara Yang Telah Memiliki PLTN dalam Pengelolaan BBNB

a. China

China memiliki 8 PLTN *PWR* dan 2 *PHWR* (*Pressurized Heavy Water Reactor*) dengan kapasitas total 7.572 MWe, 5 *PWR* dengan kapasitas 4.220 MWe sedang dalam konstruksi. China menganut siklus daur tertutup. Semua BBNB disimpan di reaktor. Proses olah-ulang BBNB skala pilot dengan kapasitas 0.1 tHM/tahun dibangun di Lanzhou, beroperasi tahun 2001. Penyimpanan basah tersentralisasi dengan kapasitas 550 tHM beroperasi tahun 2003 di kompleks bahan bakar nuklir Lanzhou.

b. Jepang

PLTN Jepang pertama berjenis *BWR* (*Boiling Water Reactor*) dengan kapasitas 13 MWe dan terhubung ke sistem kelistrikan pada tahun 1963. Sampai saat ini ada 23 PLTN tipe *PWR* dan 32 PLTN tipe *BWR* sedang beroperasi dengan kapasitas mencapai 47.587 MWe, menyumbang energi sebesar 29,97 % dari produksi listrik nasional Jepang tahun 2006. Empat reaktor *shutdown* permanen dan satu *PWR* kapasitas 86 MWe sedang dibangun di HOKAIDO.

Jepang menganut siklus bahan bakar nuklir daur tertutup yang mempunyai fasilitas olah ulang BBNB dengan kapasitas 0.7 tHM/hari dan fasilitas kolam penyimpanan sementara *AFR* berkapasitas 140 tHM beroperasi di Tokai pada tahun 1977. Sampai akhir tahun 2002 tidak ada BBNB di fasilitas *AFR* Jepang, pabrik olah ulang BBNB di Tokai telah memproses sekitar 1009 t Udisamping itu Jepang juga membuat kontrak dengan Perancis dan Inggris untuk memproses ulang 5600 t U BBNB *LWR* yang pengirimannya selesai akhir September 1998.

c. Korea Selatan

Korea Selatan memulai program PLTN komersial pertama pada tahun 1977 dengan mengoperasikan *PWR* 600 MWe, lima tahun kemudian Korea mengoperasikan PLTN jenis *PHWR* 600 MWe. Sampai saat ini ada PLTN, 16 tipe *PWR* dan 4 tipe *PHWR* beroperasi dengan kapasitas total 18 GWe menyumbang energi sekitar 38.64 % listrik nasional tahun 2006, satu PLTN jenis *PWR* dengan kapasitas 1000 MWe sedang dalam konstruksi dan direncanakan beroperasi tahun 2010.

Korea Selatan menganut siklus daur bahan bakar nuklir terbuka, BBNB disimpan di masing-masing bangunan PLTN. *KHNP* (*Korea Hydro Nuclear Power*) mengoperasikan fasilitas penyimpanan BBNB sistem kering *AFR* untuk reaktor *PHWR* di Wolsong pada tahun 1994 dengan kapasitas 1212 tHM. *AEC* (*Atomic Energy Commission*), badan pembuat kebijakan tenaga atom tertinggi di Korea memutuskan untuk membangun fasilitas penyimpanan BBNB sistem kering diluar lokasi reaktor (*AFR*) dan menunjuk *KAERI* (*Korean Atomic Energy Research Institute*) sebagai organisasi nasional pengelolaan limbah tahun 1984, namun pada tahun 1999 tugas pengelolaan limbah dipindahkan ke *NETEC* (*Nuclear Environment Technology Institute*) yang merupakan divisi khusus dibawah *KHNP*.

Persiapan dan pemilihan lokasi untuk penyimpanan sementara BBNB diluar lokasi reaktor (*AFR*) Korea dan penelitian aspek-aspek teknik fasilitas penyimpanan sementara BBNB dilakukan oleh *NETEC*, penyimpanan kering BBNB diluar lokasi reaktor (*AFR*) untuk BBNB jenis *PWR* direncanakan beroperasi tahun 2016 dengan kapasitas 2000 tHM.

d. Perancis

Perancis mulai menggunakan listrik dari PLTN tahun 1959 dengan mengoperasikan PLTN jenis *GCR* (*Gas Cooled Reactor*) yang sekarang sudah *shutdown*. Reaktor jenis *GCR* mendominasi Perancis sampai tahun 1973, setelah itu pemerintah Perancis memutuskan untuk mengkonsentrasikan pada PLTN jenis *PWR*. Sampai saat ini terdapat 58 *PWR* dengan kapasitas total 61.5 GWe, menyumbang 78 % kebutuhan listrik nasional Perancis tahun 2006.

Perancis menganut siklus tertutup dengan mengolah ulang BBNB *PWR* dan menggunakan kembali plutonium dan uranium dalam PLTN *PWR*. Semua bahan bakar nuklir bekas *GCR* (18000 tHM) telah diolah-ulang di Cogema UP1 yang berlokasi di Marcole yang sekarang sudah dekomisioning. BBNB *PWR* Perancis dikirim ke kolam penyimpanan sementara *AFR* La Hague untuk pendinginan sebelum diolah ulang di Cogema UP2. BBNB dari luar Perancis diolah ulang di Cogema UP3 La Hague. Uranium dan plutonium digunakan kembali di fasilitas fabrikasi bahan bakar. Limbah dari proses olah-ulang BBNB dikondisioning dan disimpan sementara sebelum dikirim ke *ANDRA* (*Agency nationale pour la gestion des déchets radioactifs*) atau pelanggan luar negeri. Jumlah total BBNB *LWR* yang telah diolah ulang lebih dari 18300 tHM. Limbah Aktivitas Tinggi yang telah dikondisioning disimpan di lokasi pengolahan menunggu lokasi disposal yang disiapkan oleh *ANDRA*.

e. Jerman

Jerman mulai mengoperasikan PLTN *BWR* 15 MWe pada tahun 1961, lima tahun kemudian menambah 3 PLTN *PHWR*, *PWR* dan *BWR* masing-masing berkapasitas 52, 62 dan 237 MWe. Sampai tahun 1971 Jerman memiliki 8 PLTN dengan kapasitas total mencapai 1.000 MWe yang semua sudah dalam status *shutdown* permanen. Saat ini Jerman mengoperasikan 11 *PWR* dan 6 *BWR* dengan kapasitas total sekitar 21 GWe, total produksi listrik PLTN untuk tahun 2006 di Jerman 158.709.486 GWh(e), atau 31.82 % dari total penggunaan listrik di Jerman.

Jerman menganut siklus daur bahan bakar nuklir terbuka dan tertutup. Semua kegiatan olah ulang BBNB dalam negeri dihentikan, proses olah ulang BBNB dilakukan dengan kontrak mengirim BBNB ke Inggris dan Perancis. Amandemen Undang-undang di Jerman tahun 1994 mengizinkan pembuangan BBNB di *repository* geologi sebagai pengganti penghentian olah-ulang BBNB. Dan aturan baru tahun 2001 melarang transportasi BBNB ke fasilitas olah-ulang BBNB setelah pertengahan 2005. BBNB yang tidak dikirim ke luar negeri untuk olah-ulang BBNB disimpan di fasilitas penyimpanan sementara tersentralisasi.

f. Amerika Serikat

Amerika Serikat mengoperasikan 103 PLTN dengan kapasitas total 99,25 GWe, menghasilkan listrik 787.219,77 GWh(e) atau 19,42 % kebutuhan energi listrik Amerika Serikat tahun 2006. PLTN pertama Amerika Serikat jenis BWR dengan kapasitas 24 MWe beroperasi tahun 1957 di California. Tidak ada pabrik olah-ulang BBNB yang beroperasi, Amerika Serikat menganut daur bahan bakar nuklir siklus terbuka.

Negara-negara yang telah disebutkan diatas telah memiliki solusi untuk tempat penyimpanan BBNB dari PLTN-nya. Gambar 4 menunjukkan tempat penyimpanan BBNB sistem *dry cask storage*



Gambar 4. Tempat Penyimpanan BBNB dari PLTN Sistem *Dry Cask Storage*

Adaptasi Teknologi Penyimpanan BBNB di Indonesia

Indonesia dapat mempelajari dan menimba pengalaman dari negara-negara yang telah memiliki dan mengoperasikan PLTN, maka BBNB dari reaktor risetnya setelah disimpan di kolam reaktor harus disiapkan tempat penyimpanan kering untuk periode berikutnya. Begitu pula bila nanti Indonesia mengoperasikan PLTN, maka selain kolam di reaktor (untuk penyimpanan sistem basah), harus disediakan pula fasilitas penyimpanan sistem kering untuk nantinya diteruskan dengan *disposal* di fasilitas formasi geologi dalam, karena Indonesia menganut daur bahan bakar nuklir terbuka, sehingga tidak diperlukan fasilitas olah-ulang BBNB.

KESIMPULAN

Saat ini, Indonesia belum memiliki PLTN. BBNB yang ditimbulkan dari ketiga reaktor risetnya di Yogyakarta, di Bandung dan di Serpong telah dikelola dengan baik. Penanganan BBNB dari reaktor riset di Serpong menjadi tugas dan tanggung jawab PTLR. Sampai saat ini BBNB tersebut masih disimpan di kolam KH – IPSB3 (Kanal Hubung – Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas), dan belum ada fasilitas untuk penyimpanan kering. Bila nanti PLTN jadi dibangun, maka BBNB yang ditimbulkannya harus dikelola, disamping di kolam (*wet storage*) juga harus sudah disiapkan fasilitas untuk penyimpanan keringnya, yaitu metoda *dry cask storage*.

Dari pengoperasian PLTN 1000 MW selama 18 bulan, ditimbulkan BBNB sebanyak 64 bundel atau 29,805 MtU. Setelah penyimpanan dalam kolam untuk pendinginan dan peluruhan aktivitas BBNB yang baru keluar dari reaktor, maka sudah harus disiapkan tempat penyimpanan sistem kering *dry cask storage*. Dari pengalaman negara-negara yang sudah mempunyai PLTN, penyimpanan BBNB dengan sistem kering *dry cask storage* telah berlangsung puluhan tahun tanpa kendala yang berarti sampai nanti penyimpanan di tempat yang lestari di formasi geologi dalam siap digunakan.

DAFTAR PUSTAKA

- [1].WATI, NUROKHIM, “Pengelolaan Bahan Bakar Nuklir Bekas dari Reaktor Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir”, Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengolahan Limbah VI.
- [2].GONYEAU, J., “The Virtual Nuclear Tourist, Nuclear Power Plants Around the World” , (on line). <http://www.nucleartourist.com> diakses tanggal 10 April 2006.
- [3].WESTING HOUSE ELECTRIC COMPANY, “Radioactive Waste Management, AP 1.000 Design Control Document”, AP 1.000 Design Document, Revision 17, Westing House, Pittsburgh, 2010.
- [4].SALIMIN, Z, ”Pemikiran Pengelolaan Bahan Bakar Bekas untuk Operasi PLTN di Masa Yang Akan Datang”, Prosiding Seminar XII Teknologi dan Keselamatan PLTN Serta Fasilitas Nuklir, Yogyakarta, 5 – 6 September 2006.
- [5].5. SALIMIN, Z, “Safe Handling of Irradiated Fuel of Indonesian Multi Purpose Reactor of 30 MW” , Proceeding of Waste Management 1998 Conference , March 1 – 5, 1998, Tucson, Arizona, USA.
- [6].SALIMIN, Z, “Peran dan Perkembangan Operasi Teknik Kimia Pengolahan Limbah Radioaktif Untuk Mendukung Aplikasi Iptek Nuklir di Indonesia”, Orasi Pengukuhan Profesor Riset Bidang Teknologi Evaporasi, BATAN, Serpong, 27 Desember 2007.
- [7].INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, “Evaluation of Spent Fuel as a Final Waste Form”, Technology Reports Series No. 320, Vienna, 1991.
- [8].NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, “Dry Cask Storage”, Retrieved 2011-03-17.

- [9].NUCLEAR REGULATORY COMMISSION, “ Spent Fuel Storage in Pools and Dry Casks : Key Points and Questions & Answers”, Retrieved 2013-11-27.
- [10]. ZAINUS SALIMIN, DYAH SULISTYANI RAHAYU :”Unjuk Kerja Penyimpanan Bahan Bakar Nuklir Bekas PLTN dalam Kaitan dengan Teknologi Penyimpanannya”, Prosiding Seminar Nasional ke-16 Teknologi dan Keselamatan PLTN serta Fasilitas Nuklir, ISSN :0854-2910.

