

Urania

Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir

Beranda jurnal: <http://jurnal.batan.go.id/index.php/urania/>



POTENSI LINGKUNGAN KAWASAN NUKLIR SERPONG DAN EVALUASI KESELAMATAN UNTUK TAPAK FASILITAS *BOREHOLE DISPOSAL* LIMBAH SUMBER RADIASI BEKAS

Risdiyana Setiawan¹, Kartini Megasari², Sucipta¹, Andry Setiawan¹

¹Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif – BRIN
K.S.T. B.J. Habibie Gd. 720, Serpong, Tangerang Selatan, Banten 15314

²Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia

Jl. Babarsari POB 6101/YKKB, Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta 55281

e-mail: risd004@brin.go.id

(Naskah diterima: 10–10–2022, Naskah direvisi: 17–11–2022, Naskah disetujui: 06–02–2023)

ABSTRAK

POTENSI LINGKUNGAN KAWASAN NUKLIR SERPONG DAN EVALUASI KESELAMATAN UNTUK TAPAK FASILITAS *BOREHOLE DISPOSAL* LIMBAH SUMBER RADIASI BEKAS.

Penyimpanan lestari terhadap sumber radiasi bekas (*disused sealed radioactive sources = DSRS*) masih menghadapi beberapa rintangan, antara lain karena DSRS umumnya berumur paro panjang, tingkat radiasi gamma-photon tinggi, sulitnya opsi untuk dikembalikan ke negara pembuat, dan aktivitas melampaui batas untuk *shallow land disposal*. Untuk itu perlu dikembangkan sistem penyimpanan lestari limbah DSRS dengan fasilitas skala kecil yang ekonomis, memenuhi standar keselamatan pekerja, masyarakat dan lingkungan. Jawaban untuk masalah ini adalah dengan konsep penyimpanan lestari dalam lubang bor (*borehole disposal = BHD*). Penelitian ini fokus pada evaluasi potensi lingkungan Kawasan Nuklir Serpong (KNS) untuk tapak fasilitas *BHD* dan keselamatannya sesuai dengan standar *IAEA* yaitu *borehole disposal of disused sealed sources (BOSS)*. Evaluasi lingkungan KNS dilakukan dengan karakterisasi dan evaluasi keselamatan lingkungan geologi dan non geologi untuk tapak *BHD* sesuai standard *IAEA*. Secara umum, hasil evaluasi parameter lingkungan terhadap kriteria tapak disposal menunjukkan adanya kesesuaian. Namun ada beberapa parameter yang perlu diberikan solusi teknologi (*engineered barrier*) agar fungsi tapak sebagai *natural barrier* dapat terpenuhi. Beberapa solusi teknologi tersebut meliputi kemasan limbah (kapsul dan kontainer), buffer dan *backfill* material, pelapis lubang bor (*casing*), pemasangan *basement plug* dan *upper/cover plug*. Hasil dari pengkajian keselamatan dengan *Borehole Disposal Concept (BDS) scoping tools* menunjukkan bahwa konsep fasilitas *BHD* pada tapak KNS termasuk dalam zona hijau (*green zone*) yang berarti aman, dengan nilai total dosis maksimal sebesar $7.2e-9$ Sv/y di tahun 46.678y. Menggunakan system standar *BOSS* dengan penambahan *engineered barrier* maka lokasi tapak di KNS memenuhi kriteria dan berpotensi untuk penempatan fasilitas *borehole disposal* limbah DSRS.

Kata kunci: potensi, lingkungan, tapak, keselamatan, *borehole disposal*.

ABSTRACT

ENVIRONMENTAL POTENTIAL OF THE SERPONG NUCLEAR AREAS AND SAFETY EVALUATION FOR THE SITE OF BOREHOLE DISPOSAL FACILITY FOR USED RADIATION SOURCES WASTE. Disposal of used radiation sources (DSRS) still faces several obstacles, among others, because DSRS generally have a long half-life, high levels of gamma-photon radiation, difficult options for returning to the country of manufacture, and activity that exceeds the limit for shallow land disposal. For this reason, it is necessary to develop a disposal system for DSRS waste with small-scale facilities that are economical, meet worker, community and environmental safety standards. The answer to this problem is the concept of borehole disposal (BHD). This study focuses on evaluating the environmental potential of the Serpong Nuclear Area (KNS) for the BHD facility site and its safety according to the IAEA standard, namely borehole disposal of disused sealed sources (BOSS). Environmental evaluation of KNS is carried out by characterization and evaluation of geological and non-geological environmental safety for BHD sites according to IAEA standards. In general, the results of the evaluation of environmental parameters against the criteria for the disposal site indicate a suitability. However, there are several parameters that need to be given a technological solution (engineered barrier) so that the site's function as a natural barrier can be fulfilled. Some of these technological solutions include waste packaging (capsules and containers), buffer and backfill materials, borehole linings (casing), basement plug and upper/cover plug installation. The results of the safety assessment using Borehole Disposal Concept (BDS) scoping tools show that the BHD facility concept at the KNS site is included in the green zone which means it is safe, with a maximum total dose value of $7.2e-9$ Sv/y in 46,678y. Using the BOSS standard system with the addition of an engineered barrier, the site location at KNS meets the criteria and has the potential for placement of the DSRS waste borehole disposal facility.

Keywords: potential, environment, site, safety, borehole disposal.

PENDAHULUAN

Penyimpanan lestari terhadap limbah sumber radioaktif bekas (*disused sealed radioactive sources = DSRS*) menghadapi beberapa kendala, antara lain karena DSRS umumnya berumur paro panjang, tingkat radiasi gamma-photon tinggi, sistem penyimpanan belum mapan, sulitnya opsi untuk dikembalikan ke negara pembuat, aktivitas melampaui batas untuk *shallow land disposal*. Untuk itu perlu dikembangkan sistem penyimpanan lestari terhadap DSRS dengan fasilitas nasional skala kecil yang tidak mahal, memenuhi standard keselamatan terhadap pekerja, masyarakat dan lingkungan, serta mencegah kemungkinan intrusi oleh pihak yang tidak dikehendaki. Jawaban untuk masalah ini adalah dengan konsep penyimpanan lestari dalam lubang bor atau *borehole disposal* (BHD) [1].

Konsep BHD adalah penempatan limbah radioaktif padat di dalam *engineered facility* khusus berupa lubang bor berdiameter relatif sempit dan pengoperasiannya langsung dari atas permukaan bumi. Kedalaman BHD bervariasi dari beberapa meter hingga ratusan meter, bahkan bisa ribuan meter untuk disposal bahan bakar nuklir bekas (BBNB), dengan diameter lubang bor antara beberapa puluh centimeter hingga lebih dari satu meter [2]. Lubang bor bisa diberi pelapis (*casing*), limbah DSRS dan atau BBNB dikungkung dalam kemasan wadah yang aman, dan penempatannya dalam lubang bor diisolasi dengan bahan isian (*backfill materials*). Fasilitas disposal bisa terdiri dari lubang bor tunggal atau ganda yang lokasinya tidak harus berada di dalam kawasan nuklir tertentu. Dengan konsep BHD tersebut diharapkan masalah penyimpanan DSRS dan atau BBNB dapat ditangani dengan baik, yang dilandasi dengan karakterisasi tapak, teknik pemboran, desain paket kapsul DSRS/BBNB, fasilitas repository dan pengkajian keselamatan yang memadai dan akhirnya setelah ditemukan konsep yang optimal akan bisa diterapkan di masa mendatang, untuk mendukung program nuklir nasional yang dapat diterima masyarakat [3].

Penelitian ini fokus pada evaluasi potensi lingkungan Kawasan Nuklir Serpong (KNS) untuk tapak fasilitas BHD dan keselamatannya sesuai dengan standar IAEA yaitu *borehole disposal of disused sealed sources* (BOSS). Evaluasi lingkungan KNS dilakukan dengan karakterisasi dan evaluasi

keselamatan lingkungan geologi dan non geologi untuk tapak BHD sesuai standard IAEA. Pada penelitian ini dilakukan karakterisasi dan evaluasi tapak fasilitas *borehole disposal* dengan kriteria sebagai berikut: 1) Lingkungan batuan tak jenuh secara permanen atau minimal lingkungan jenuh dengan permeabilitas rendah; 2) Gradien hidrolik rendah; 3) Sedikit atau tanpa ditemukan sumberdaya air dan mineral; 4) Laju erosi rendah dan tidak ada (sedikit) potensi banjir, hujan lebat dan ketidak-stabilan lahan; 5) Stabil secara tektonik dan jauh dari zona patahan aktif; 6) Struktur geologi dan sistem hidrogeologi sederhana; dan 7) Aksesibilitas, kepemilikan lahan, infrastruktur, aspek sosial dan faktor perencanaan. Dengan kriteria tersebut diharapkan dapat ditentukan tapak yang tepat untuk menjamin keselamatan fasilitas *borehole disposal*.

Untuk menjamin keselamatan, fasilitas disposal perlu mengkombinasikan *natural barrier* dan *engineered barrier*, disertai dengan kontrol institusional sampai dengan waktu radionuklida meluruh hingga tingkatan radiasinya tidak signifikan lagi bagi keselamatan manusia dan lingkungan.

Pemilihan tapak disposal limbah radioaktif merupakan suatu tahapan penting dalam sistem pengembangan penyimpanan limbah yang akan memberikan kesesuaian terbaik terhadap kebutuhan untuk akomodasi limbah dari program nuklir nasional dan yang memenuhi semua persyaratan aspek keselamatan, teknik dan lingkungan yang telah ditentukan dalam berbagai peraturan atau arahan/petunjuk nasional maupun internasional. Bilamana hal-hal tersebut diterapkan secara benar maka suatu sistem disposal akan menjamin isolasi radionuklida yang memadai dari biosfer selama periode waktu yang diperlukan untuk meluruhkan ke level yang aman [3]. Pemilihan tapak yang sesuai wajib disertai dengan pengkajian keselamatan dan dampak lingkungan. Setiap pengkajian harus mencerminkan proses pengambilan keputusan dan mengandung keadaan/ kejadian yang mendukung keputusan. Pada umumnya, pengkajian meliputi tidak hanya evaluasi pengaruh yang mungkin ada dari disposal yang direncanakan terhadap kesehatan manusia dan lingkungan saat ini dan yang akan datang, tetapi juga pengaruh lingkungan terhadap fasilitas disposal tersebut.

Pengkajian keselamatan *borehole disposal* dilaksanakan dengan studi literatur dan studi kasus yang diuraikan secara deskriptif. Beberapa data primer dan sekunder tentang limbah DSRS dan data tapak lingkungan sebagai bahan masukan untuk pengkajian keselamatan. Beberapa data asumsi juga digunakan dalam pengkajian ini melalui pendekatan kesesuaian terhadap kondisi limbah, disain, tapak dan lingkungan. Seluruh data yang digunakan telah disusun secara sistematis. Pengkajian keselamatan *borehole disposal* ini dilaksanakan dengan metode deskriptif yang sistematis mengacu pada *Improvement of Safety Assessment Methodologies (ISAM)* [4]. Metode ini meliputi penentuan konteks pengkajian, deskripsi sistem disposal, pengembangan dan justifikasi skenario, perumusan dan implementasi model, pelaksanaan analisis dan interpretasi hasil pengkajian keselamatan untuk dasar pengambilan keputusan selanjutnya.

BDC Scoping tools merupakan suatu perangkat lunak yang dikembangkan oleh IAEA untuk meningkatkan kapasitas negara-negara anggota yang berpartisipasi dalam penilaian lokasi potensial untuk konsep *borehole disposal*. Sistem operasi pada perangkat lunak ini mengambil asumsi beberapa kombinasi lapisan zona hidrogeologi, karakteristik lapisan zona geokimia yang meliputi parameter kimia air tanah. Perangkat lunak ini terintegrasi dengan *radionuclide inventory IAEA* dan system geometri dari fasilitas dapat dilakukan secara bervariasi. Keluaran dari perangkat lunak ini berupa informasi secara detail mengenai waktu degradasi *backfill* semen dan kontainer, waktu dan alasan kegagalan kontainer dan kapsul disposal, waktu degradasi *backfill* semen dan pelindung kontainer, waktu masuknya radionuklida di sumur, konsentrasi radionuklida pada saat masuk dalam air sumur, dan keberadaan gas saat kapsul rusak. Selain itu, dosis puncak untuk masing-masing radionuklida melalui jalur air tanah dan gas. Perangkat lunak ini dapat membedakan hasil yang terkait dengan anak luruh radionuklida dan radionuklida induk. Perangkat lunak ini mengevaluasi ketahanan kapsul dan kontainer disposal pasca-penutupan serta memungkinkan pengambilan keputusan yang cepat dengan memberikan indikasi awal tentang potensi dan kesesuaian tapak berdasarkan karakteristik hidrokimia [5].

METODOLOGI

Penelitian ini dilaksanakan dengan metode deskriptif dengan ruang lingkup meliputi studi pustaka, penyusunan kriteria tapak dan disain disposal, karakterisasi lingkungan, kajian teknologi, pengkajian keselamatan serta analisis hasil studi.

Kajian dan langkah-langkah yang dilakukan melalui tahapan-tahapan sebagai berikut: 1) Penentuan kriteria tapak dan disain disposal berdasarkan panduan atau rekomendasi IAEA dan pendapat para pakar; 2) Pengumpulan data dan informasi aspek DSRS, tapak, teknologi dan keselamatan *borehole disposal*; 3) Data dan informasi tersebut digunakan sebagai dasar evaluasi dan pengkajian keselamatan.

A. Evaluasi Lingkungan untuk Tapak Fasilitas *Borehole Disposal*

Evaluasi lingkungan tapak dilakukan melalui karakterisasi tapak terpilih untuk *borehole disposal* berdasarkan *Site Characterization Methodology* mengacu pada *IAEA Safety Standards of Borehole Disposal Facilities for Radioactive Waste No.SSG-1* [2] sebagai berikut.

1. Karakterisasi aspek lingkungan geologi tapak Kawasan Nuklir Serpong dan sekitarnya:
 - a) Kondisi geomorfologi;
 - b) Litologi dan stratigrafi;
 - c) Struktur geologi;
 - d) Sistem hidrologi dan hidrogeologi;
 - e) Potensi bencana alam geologi.
2. Karakterisasi aspek lingkungan non-geologi tapak Kawasan Nuklir Serpong dan sekitarnya:
 - a) Klimatologi
 - b) Nilai dan penggunaan lahan
 - c) Sumber daya alam
 - d) Luas, letak dan aksesibilitas
 - e) Posisi dan jarak dari permukiman
 - f) Hak atas tanah

B. Pengkajian Keselamatan *Borehole Disposal*

Pengkajian keselamatan fasilitas *borehole disposal* disusun berdasarkan aspek-aspek dasar dalam desain fasilitas *borehole* yaitu: 1) Identifikasi dan pelengkapan data limbah DSRS; 2) Penentuan desain *borehole* agar limbah DSRS aman dengan kemasan yang sesuai; 3) Penerapan kombinasi *natural barrier* dan *engineered barrier* untuk menjamin keselamatan manusia dan proteksi terhadap

lingkungan; 4) *Safety assessment*, menggunakan metode ISAM (*Improvement of Safety Assessment Methodologies*), meliputi penentuan konteks pengkajian, deskripsi sistem disposal, pengembangan dan justifikasi skenario, perumusan dan justifikasi skenario, perumusan dan

implementasi model, pelaksanaan analisis dan interpretasi hasil pengkajian keselamatan untuk dasar pengambilan keputusan selanjutnya. Diagram alir kajian keselamatan metode ISAM seperti ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir pengkajian keselamatan dengan metode ISAM [4]

HASIL DAN PEMBAHASAN

Konsep *borehole disposal* untuk penyimpanan DSRs dilandasi oleh beberapa parameter diantaranya karakterisasi tapak, teknik pemboran, desain paket kapsul DSRs, fasilitas repository dan pengkajian keselamatan yang memadai. Penelitian ini mentitik beratkan pada karakterisasi tapak dan pengkajian keselamatan *borehole disposal* untuk mendapatkan konsep yang optimal.

A. Evaluasi Lingkungan Kawasan Nuklir Serpong untuk Tapak Fasilitas *Borehole Disposal*

Suatu tapak yang *suitable* (sesuai) dapat dipilih baik dari proses penciptaan calon dari sejumlah calon tapak, atau dengan secara obyektif mengevaluasi satu tapak yang diusulkan sebagai tapak potensial. Apapun yang dipilih dari kedua metode tersebut yang

penting bisa terjamin diperolehnya sistem penyimpanan limbah yang dapat menjawab persyaratan keselamatan, teknik dan lingkungan.

Tujuan dari pemilihan tapak ialah untuk mencari suatu tapak, yang bila dilengkapi dengan desain, bentuk limbah, tipe dan kuantitas kemasan limbah, penghalang rekayasa dan kontrol institusional yang memadai, akan menjamin proteksi radiasi terhadap persyaratan yang telah ditentukan oleh badan pengawas.

Pemilihan tapak sistematis untuk fasilitas disposal meliputi empat tahapan yaitu meliputi: 1) tahap konsep dan perencanaan; 2) tahap survey daerah; 3) tahap karakterisasi tapak; dan 4) tahap konfirmasi tapak [6]. Secara lengkap, hasil karakterisasi dan evaluasi lingkungan KNS untuk tapak BHD ditampilkan dalam Tabel 1.

Tabel 1. Evaluasi Kesesuaian Lingkungan KNS untuk Tapak Disposal (BHD) berdasarkan Kriteria Geologi

No.	Aspek Lingkungan	Parameter	Kriteria tapak [7],[9]	Karakteristik di lapangan	Evaluasi	Optimasi
1.	Geo-morfologi	Bentuk lahan	Bentuk lahan tidak berbukit dan bukan lembah	Dataran bergelombang (56-76 m)	Sesuai	-
		Kelerengan	Kelerengan kecil	0° s/d 7,41°	Sesuai	-
		Proses	Proses geomorfologi tidak ada atau kecil	Pelapukan, erosi, gerakan tanah dalam level aman [8]	Sesuai	-
2.	Batuan & Stratigrafi	Permeabilitas	Permeabilitas rendah	$1,83.10^{-8}$ - $9,72.10^{-6}$ m/s [10]	Sesuai	-
		Adsorpsi	Sifat adsorpsi baik	Kd = 1,6-8,9 (Co-60) & 3,2-7,7 (Cs-137) [11]	Sesuai	-
		Kekuatan	Kompak, keras dan homogen	Sedang-keras-relatif homogen	Sesuai	-
		Perlapisan	Perlapisan relatif sederhana	Berlapis sederhana	Sesuai	-
3.	Struktur	Kondisi struktur	Struktur geologi relatif sederhana	Tidak ada sesar aktif di permukaan [12]	Sesuai	-
4.	Hidrologi & Hidrogeologi	Aliran permukaan	Limpasan rendah Jauh dari tubuh air permukaan	Rendah Jarak 175 m	Sesuai Kurang sesuai	- Eng. barrier
		Pola aliran air tanah	Pola aliran airtanah sederhana	Sub-paralel	Sesuai	-
5.	Bencana alam geologi	Gempa	Potensi bahaya gempabumi rendah	Rendah (0,2-0,25 g) [13]	Sesuai	-
		Gunungapi	Potensi bencana gunungapi rendah	Jauh dari gunung api	Sesuai	-
		Gerakan tanah	Potensi erosi dan gerakan tanah rendah	Ada bekas tanah longsor di bagian tebing	Sesuai	-
		Banjir	Tidak ada banjir	Tidak ada	Sesuai	-

Secara geomorfologi, lahan tapak relatif memenuhi persyaratan dengan kontur yang tidak berbukit dan tidak berlembah, serta kelerengan dan intensitas proses geomorfologi kecil. Walaupun dalam aspek ini tapak yang ada telah memenuhi kriteria, tetapi tetap dilakukan optimasi dengan menempatkan fasilitas disposal pada lokasi sejauh mungkin dengan sungai, lereng, dan zona yang memiliki potensi erosi yang besar, yaitu ke arah timur – timur laut [7].

Untuk aspek litologi dan stratigrafi, calon fasilitas BHD ditempatkan pada formasi batuan yang nilai permeabilitasnya rendah, nilai adsorpsinya tinggi, kompak keras, dan homogen, yaitu pada batu lempung yang berada pada kedalaman >20 m (zona *aquiclude*). Namun pada kasus tapak KNS, tingkat heterogenitas batuan pada zona *aquiclude/semi aquiclude* ditinjau dari sudut hidrogeologi sangat tinggi. Terdapat perselingan batu pasir dan batu gamping, dan pengkekaratan intensif yang menjadikan

nilai permeabilitas cukup tinggi antara 10^{-6} sampai 10^{-4} cm/s, sehingga tidak terlalu ideal sebagai sistem penghalang alami (natural barrier system) [8]. Nilai *Rock Mass Rating* (RMR) batuan *aquiclude* berkisar 31-60 atau dalam kelas *poor – fair rock* akan menjadi hambatan dalam konstruksi lubang bor karena *stand up time* yang tidak lama. Secara mineralogi, montmorilonit pada batuan bisa menjadi gangguan serius pada pekerjaan konstruksi, ekskavasi dalam atau pemboran untuk pembuatan disposal karena sifat *swelling* (mengembang) yang sangat tinggi. Selain itu keterdapatn kalsit yang dapat terlarut dalam air tanah dapat menjadi jalur tambahan migrasi radionuklida [8].

Untuk aspek struktur geologi, pada tapak KNS tidak ditemukan struktur geologi yang secara signifikan berpengaruh pada sistem *borehole disposal*, oleh karena itu tidak diperlukan optimasi untuk antisipasi aspek struktur geologi.

Potensi Lingkungan Kawasan Nuklir Serpong Dan Evaluasi Keselamatan Untuk Tapak Fasilitas *Borehole Disposal* Limbah Sumber Radiasi Bekas (Risdiyana Setiawan, Kartini Megasari, Sucipta, Andry Setiawan)

Lapisan akuifer di bawah zona vadose mempunyai permeabilitas yang sangat besar yaitu $3,65 \times 10^{-3}$ cm/s, dengan arah aliran menuju lereng di sebelah barat. Walaupun demikian, perlu dilakukan usaha untuk mencegah erosi dengan membuat permukaan lahan diberi penutup vegetasi (rumput) dan perkerasan pada tempat-tempat tertentu yang rawan erosi [8].

Pada tapak KNS tersebut, terdapat kerawanan gerakan tanah di bagian lereng barat-barat daya. Di samping itu, perlu dilakukan usaha pencegahan bahaya gerakan tanah dengan mengurangi kejenuhan atau kandungan air tanah di daerah sekitar tapak hingga daerah berlereng di bagian barat. Usaha pencegahan tersebut dengan cara membuat

sistem drainase dengan lubang bor horisontal dari arah lereng sampai dengan daerah sekitar fasilitas borehole untuk melancarkan aliran tanah ke arah hilir (lereng), sehingga muka air tanah akan tetap terjaga paling dangkal 11 meter [8].

Karakterisasi lingkungan non geologi tapak borehole merupakan aspek penting dalam tahapan evaluasi tapak. Karakterisasi lingkungan non-geologi berhubungan dengan keselamatan masyarakat. Aspek-aspek yang dikaji meliputi data klimatologi, penggunaan lahan, sumberdaya alam, letak, luas, akses, posisi dan jarak dari permukiman serta hak atas tanah. Rangkuman karakterisasi non geologi tapak *borehole disposal* dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Tabel 2 Evaluasi Kesesuaian Lingkungan KNS untuk Tapak Disposal (BHD) berdasarkan Kriteria Non Geologi

No.	Aspek Lingkungan	Parameter	Kriteria tapak	Karakteristik di lapangan	Evaluasi	Solusi
1.	Klimatologi	Curah hujan	Curah hujan rendah	45.65 - 279,9 mm [14]	Sesuai	-
		Temperatur	Normal (tidak ekstrim)	20°C sd 35°C (rerata 25,4°C sd 27,5°C) [14]	Sesuai	-
		Kondisi atmosfer	Normal dan stabil	Netral hingga stabil [14]	Sesuai	-
2.	Penggunaan Lahan	Penggunaan Lahan	Lahan kosong, bernilai rendah atau bisa <i>co-location</i>	Lahan kosong dekat fasilitas IPLR	Sesuai	-
3.	Sumber-daya alam geologi	Mineral	Tidak ada atau potensi rendah	Tidak ada	Sesuai	-
		Lahan	Nilai lahan rendah	Nilai tinggi tetapi bisa <i>co-location</i>	Sesuai	-
		Air tanah	Tidak ada atau rendah	Kurang lebih 0,22 l/s [8]	Sesuai	-
4.	Letak, luas dan aksesibilitas	Letak	Dekat dengan zona limbah	Sangat dekat dengan IPLR	Sesuai	-
		Luas	Luas memadai	0,8 Ha	Sesuai	-
		Aksesibilitas	Lokasi mudah dijangkau	Mudah, ada jaringan jalan	Sesuai	-
5.	Posisi dan Jarak dari permukiman	Posisi	Hulu aliran air tanah	Utara dan timur (parallel)	Sesuai	-
		Jarak	Jauh dari permukiman	Dekat (± 1 km)	Kurang sesuai	Eng. Barrier
		Jumlah	Sesedikit mungkin	J= 86.357 orang (Kec.Setu, 2021) [15]	Kurang sesuai	Eng. Barrier
		Kepadatan	<1000 orang/km ²	K= 5.153 orang/km (Kec. Setu, 2021) [15]	Kurang sesuai	Eng. Barrier
6.	Hak atas tanah	Kepemilikan	Ada potensi untuk alih fungsi dan hak	100% milik pemerintah cq BRIN	Sesuai	-

Karakterisasi non-geologi merupakan faktor penting dalam pembangunan dan analisis dampak lingkungan dari fasilitas BHD terhadap lingkungan masyarakat, terdiri dari aspek lingkungan berupa klimatologi yang bertujuan mengetahui kondisi iklim dan intensitas curah hujan yang dapat mempengaruhi intrusi air terhadap fasilitas, penggunaan lahan, posisi jarak dari pemukiman berperan untuk memastikan keamanan dan keselamatan fasilitas terhadap lingkungan dan masyarakat, dan hak atas tanah merupakan faktor penting untuk memastikan keamanan dari intrusi manusia di masa mendatang.

B. Pengkajian keselamatan fasilitas borehole disposal limbah DSRS.

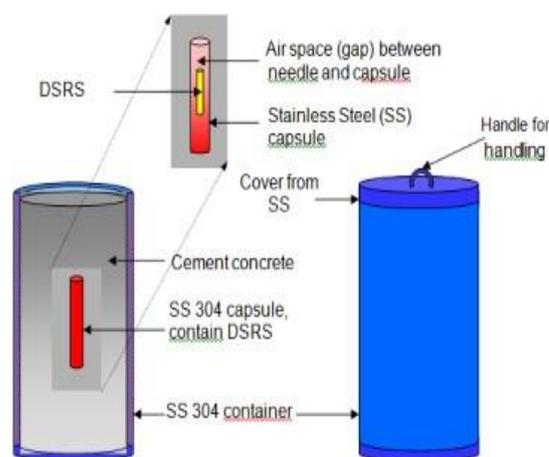
Pengkajian keselamatan fasilitas disposal limbah dilakukan untuk mengetahui kemampuan tapak dan disain fasilitas dalam mengemban fungsi kekuatan/daya dukung dan keselamatannya terhadap manusia dan lingkungan. Metode yang akan digunakan adalah metode ISAM/ASAM seperti yang telah direkomendasikan oleh IAEA [4]. Data input untuk pengkajian keselamatan Borehole disposal diperoleh dari hasil penelitian, data inventory limbah, akuisisi data lingkungan, terutama untuk data konsumsi penduduk terhadap produk pertanian, perikanan dan peternakan serta konsumsi air.

Kajian keselamatan fasilitas *borehole disposal* limbah radioaktif mengacu pada IAEA Safety Standards Borehole disposal Facilities for Radioactive Waste No. SSG-1, No. SSG-23 dan IAEA-TECDOC-1644 BOSS: Borehole disposal of Disused Sealed Sources [2,4,16]. Kajian dilakukan untuk memberikan jaminan kepada pemangku kepentingan (seperti pemerintah, badan regulasi, masyarakat umum, dan kelompok ilmiah) bahwa fasilitas tersebut dipilih tapaknya, didesain, dibangun, dioperasikan dan ditutup dengan memenuhi persyaratan untuk melindungi manusia dan lingkungan dalam jangka waktu yang lama. Konteks pengkajian keselamatan meliputi hal-hal sebagai berikut.

1. Konsep *Borehole Disposal*

Disused Sealed Radioactive Sources (DSRS) yang telah dikungkung dalam kapsul besar sebanyak 32 kapsul dan dalam kapsul kecil sebanyak 42 kapsul [17].

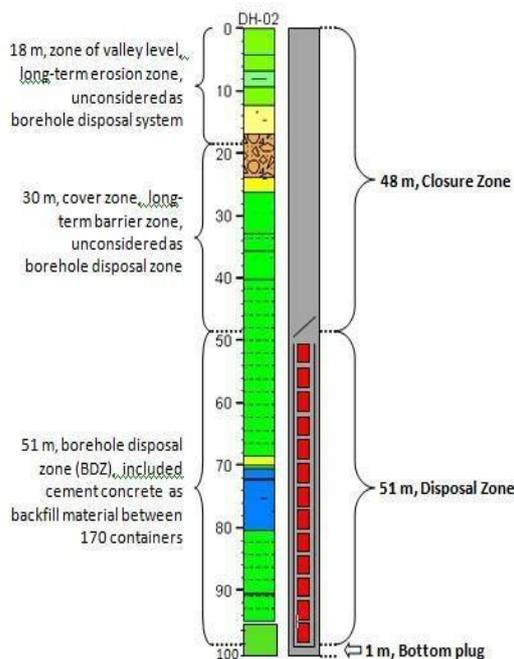
Masing-masing kapsul tersebut kemudian diwadahi dalam kontainer SS 304 dengan diameter 150 mm dan panjang 200 mm yang pada bagian atas atau ujungnya diberi pengait yang berfungsi dalam handling paket DSRS tersebut. Pemilihan bahan SS304 dikarenakan bahan tersebut memiliki ketahanan yang tinggi terhadap factor korosi dan panas yang dihasilkan oleh sumber. Ruang sisa antara kapsul dengan kontainer tersebut diisi dengan beton semen sebagai salah satu bagian dari *engineered barrier*. Salah satu desain kontainer untuk limbah DSRS dapat dilihat pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Kontainer untuk limbah DSRS [1,2]

Pewadahan dalam kontainer terhadap 32 kapsul besar dan 42 kapsul kecil, maka akan diperoleh jumlah maksimal kontainer sebanyak 74 buah yang diameter dan tingginya seragam yaitu diameter 150 mm dan tinggi 200 mm, sehingga semuanya bisa dimasukkan dalam satu lubang bor yang berdiameter 165 mm dengan dilengkapi *casing*. *Casing* berbahan HDPE yang memiliki ketahanan terhadap air dan asam serta memiliki kelenturan ketika terjadi penggeseran tanah. Untuk menjaga kekuatan penempatan dan untuk tujuan keselamatan maka antara suatu kontainer dengan kontainer di bawah dan atau atasnya perlu diberi jarak 10 cm yang diisi dengan beton semen. Total ketebalan tumpukan kontainer beserta sekat beton semen tersebut 52,00 m, sehingga jika lubang bor adalah 100 m maka kedalaman wadah atas adalah 48,00 m seperti Gambar 3 [17].

Potensi Lingkungan Kawasan Nuklir Serpong Dan Evaluasi Keselamatan Untuk Tapak Fasilitas *Borehole Disposal* Limbah Sumber Radiasi Bekas (Risdiyana Setiawan, Kartini Megasari, Sucipta, Andry Setiawan)



Gambar 3. Zonasi sistem pembuangan lubang bor [17].

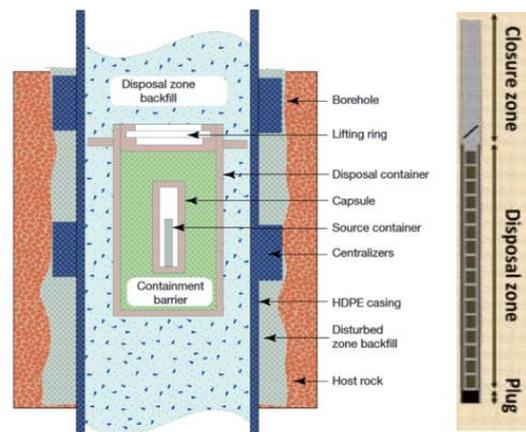
2. Penerapan kombinasi *natural barrier* dan *engineered barrier*

Berdasarkan prinsip *co-location*, lokasi dipilih di daerah sekitar Kawasan Nuklir Serpong tepatnya di DPFK-IPLN di depan IS-2 yang memiliki karakteristik lingkungan seperti terlihat pada Tabel 1.

Data pemboran hingga kedalaman 100 meter telah diperoleh dengan pemboran, sehingga diperoleh *natural barrier* (penghalang alami) yang memadai, yaitu batuanau dengan permeabilitas rendah dan daya serap tinggi, dengan lingkungan tak jenuh. Data pemboran tersebut berupa sumur DH-2 dengan kedalaman 100 m, terdiri dari tiga *natural barrier* berupa lapisan stratigrafi, yang terdiri dari lapisan tanah di bagian atas (0 m sampai 8,8 m), Formasi Serpong (8,8 m sampai 24,8 m) dan Formasi Bojongmanik (24,8 m hingga 100 m atau lebih).

Engineered barrier yang pertama yaitu *plug* semen dengan ketebalan 1 meter sebagai pondasi pertama penyimpanan paket limbah. Selain itu juga untuk menjaga agar tidak kemasukan tanah ketika proses pemasangan *casing*. Bila zona limbah berada dalam zona jenuh air, *plug* tersebut berfungsi untuk mempertahankan bagian dalam *casing* lubang bor tetap kering selama operasi disposal. *Casing* terbuat dari bahan

HDPE dengan bentuk seperti pada Gambar 4 yang dilapisi dengan *backfill* berupa semen. HDPE dipilih berdasarkan rekomendasi IAEA dikarenakan memiliki ketahanan terhadap suhu yang mampu menahan suhu ekstrem antara -100 hingga 80 C, memiliki ketahanan korosi yang tinggi dan anti bocor, kepadatan permukaan HDPE yang tinggi mencegah tembusnya cairan, permukaannya juga tidak mudah berjamur atau mendorong terjadinya reaksi korosif. HDPE ini memiliki ketahanan terhadap lapisan *backfill* karena ikatan antar molekulnya sangat kuat, sehingga tidak mudah bereaksi terhadap berbagai senyawa asam maupun basa seperti semen. *Backfill* sendiri berperan sebagai bahan isian antara paket limbah dan pelapis *casing*. Bahan *backfill* dipastikan berupa semen berkualitas tinggi dengan ketahanan terhadap sulfat, dikarenakan sulfat merupakan senyawa kimia yang bersifat asam dalam tanah dan dapat menyebabkan kebocoran dan korosi pada *casing* dan kontainer paket limbah.



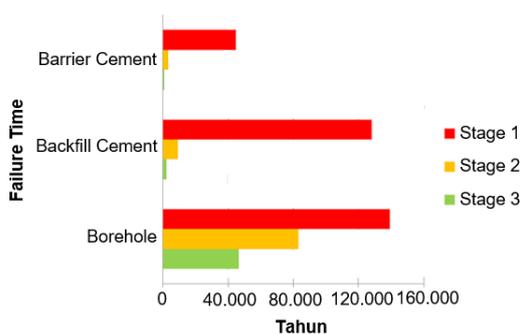
Gambar 4. *Engineered barrier* fasilitas *borehole disposal* [1,2]

Pada Gambar 4 terlihat bahwa terdapat plat defleksi atau anti intrusi di atas zona disposal. Hal tersebut merupakan salah satu *engineered barrier* keselamatan dari *borehole disposal* yaitu sebagai pencegah intrusi manusia ke dalam lubang bor dan sebagai peringatan atau tanda jika terjadi penggalian di masa depan bahwa di bawah plat ini terdapat fasilitas *borehole disposal*. Di atas plat sampai ke permukaan diisi dengan *backfill* berupa semen anti sulfat untuk mencegah terjadinya longsoran atau erosi, pergeseran tanah dan menjaga dari infiltrasi air.

3. Perumusan dan implementasi model, pelaksanaan analisis dan interpretasi hasil pengkajian keselamatan

Untuk meningkatkan kapasitas negara-negara anggota IAEA yang berpartisipasi dalam penilaian lokasi potensial untuk konsep *borehole disposal*, perangkat scoping tools telah dikembangkan. Ini memungkinkan untuk mengevaluasi ketahanan kapsul dan kontainer disposal pasca-penutupan serta memungkinkan pengambilan keputusan yang cepat dengan memberikan indikasi awal tentang potensi dan kesesuaian tapak berdasarkan karakteristik hidrokimia. Penilaian kajian keselamatan dari fasilitas ini memerlukan data konsep *borehole disposal* dan evaluasi tapak.

Berdasarkan hasil dari *BDC scoping tool* terlihat *backfill* semen akan mulai terdegradasi secara signifikan pada 11.342 tahun dan diperkirakan *backfill* akan terdegradasi seluruhnya pada 13.936 tahun. Sedangkan kontainer limbah diperkirakan akan terdegradasi setelah 34.485 tahun, degradasi tersebut dikarenakan terjadinya korosi lokal pada kontainer yang berbahan SS304, lalu pelindung semen akan mulai terdegradasi secara signifikan pada 38.438 tahun. Kapsul limbah mulai terkorosi pada 46.568 tahun kemudian akan terjadi penyebaran kontaminan (*plume*) di dalam sumur setelah 46.678 tahun. Untuk lebih lengkapnya hal-hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. *Failure time* konsep fasilitas *borehole disposal* di Kawasan Nuklir Serpong.

Berdasarkan hasil *BDC scoping tool* hasil lepasan sumber ke sumur terlihat bahwa dari kontainer sumber limbah Ra-226 (1.3×10^{-2} Bq) terbentuk anak luruh

Pb-210* (1.3×10^{-2} Bq), Po-210 (1.3×10^{-2} Bq) dan untuk paket sumber Cs-137 dan Co-60 sudah melewati waktu paruhnya yaitu 30,07 dan 5,27 tahun sehingga memiliki konsentrasi 0e0 Bq.

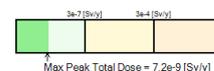
Simulasi kejadian berikutnya adalah lepasnya radionuklida ke dalam air sumur dengan konsentrasi Ra-226 sebesar (4.5×10^{-3} Bq/m³), Pb-210* (4.6×10^{-3} Bq/m³), Po-210 (4.6×10^{-3} Bq/m³). Dosis sumber Ra-226 pada lepasan sumur sebesar (9.2×10^{-10} Sv/y), Pb-210* (2.3×10^{-9} Sv/y), dan Po-210 (4×10^{-9} Sv/y).

Hasil dari keluaran *BDC scoping tools* pada Gambar 5 menunjukkan bahwa konsep fasilitas *borehole disposal* termasuk dalam zona hijau (*green zone*) yang berarti dalam zona aman. Nilai maksimal total dosis pada sumur sebesar 7.2×10^{-9} Sv/y di tahun 46.678 y dan untuk nilai maksimal total dosis pada gas sebesar 1.71×10^{-10} Sv/y di tahun ke 46.568. Berdasarkan Nilai Batas Dosis (NBD) terhadap pekerja, masyarakat, dan batasan buangan menurut BSS 115 [18], ICRP 81 [19] dan Perka BAPETEN Nomor 7 Tahun 2013 [20]. Dosis terhadap masyarakat di luar dosis latar tidak boleh lebih dari 1 mSv/th dan dosis constraint tidak lebih dari 0,3 mSv/th, maka fasilitas *borehole disposal* aman bagi masyarakat.

Berdasarkan Gambar 1 diagram alir metode *ISAM* maka dengan terpenuhinya dan dibandingkan persyaratan, konsep *borehole disposal* dan data studi kajian tapak dapat dilihat pada Gambar 6. Kapsul dan kontainer limbah fasilitas *borehole disposal* sangat aman terhadap air tanah dan inventarisasi limbah yang sudah ditentukan dan konsep tersebut diterima dan dapat membuat keputusan untuk dilanjutkan ke tahapan berikutnya yaitu pembangunan dan pengoperasian fasilitas.

Green Zone

It is very likely that the containment provided by the capsule and disposal container is sufficient to ensure safety of the disposal system for the specified groundwater conditions and inventory.



Warning: Water at this site is not potable, well pathway may not be relevant

Peak Total Dose from Well Pathway = 7.2×10^{-9} [Sv/y] at 46678 [y]
 Peak Total Dose from Gas Pathway = 1.7×10^{-11} [Sv/y] at 46568 [y]

Generated by the IAEA BDC Scoping Tool v2.0 on 5/4/2021 11:50 PM
 from the file D:\STTN\Semester 7\TA\REFERENSI\BDC.bdc

Gambar 6. Hasil GSA BHD hipotetik tapak KNS

Potensi Lingkungan Kawasan Nuklir Serpong Dan Evaluasi Keselamatan Untuk Tapak Fasilitas *Borehole Disposal* Limbah Sumber Radiasi Bekas (Risdiyana Setiawan, Kartini Megasari, Sucipta, Andry Setiawan)

SIMPULAN

Berdasarkan penelitian ini dapat disimpulkan bahwa tapak di dalam Kawasan Nuklir Serpong memenuhi kriteria keselamatan dan berpotensi untuk tapak fasilitas *borehole disposal* berdasarkan penggunaan sistem standar BOSS (IAEA *Borehole disposal of Disused Sealed Sources TECDOC 1644*) dengan penambahan *engineered barrier*. Selain itu, konsep fasilitas *borehole disposal* yang dirancang di KNS sesuai dengan *The Safety Case and Safety Assessment for the Disposal of Radioactive Waste No. SSG-23 IAEA* dengan penggunaan tiga lapis *natural barrier* pada tapak serta penggunaan *engineered barrier* berupa *casing* yang terbuat dari HDPE yang tahan asam, anti bocor dan kekuatan yang tinggi dan fleksibel, serta isian *backfill* berupa semen berkualitas tinggi anti sulfat, kontainer dan kapsul terbuat dari SS304 yang memiliki ketahanan terhadap korosi dan panas. Selanjutnya, berdasarkan analisis data menggunakan *BDC Scoping Tools* mengindikasikan bahwa tapak KNS merupakan zona aman dan berpotensi untuk fasilitas *borehole disposal*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih ditujukan kepada Kepala PTLR (pra 2022), Kepala PRTDBBNLR dan Koordinator Kelompok Riset Pengelolaan Limbah Radioaktif yang telah memfasilitasi hingga terbitnya karya tulis ini, kepada segenap dosen dan staf Poltek Nuklir Indonesia BRIN yang telah membimbing dan mengarahkan penulis dan juga segenap rekan peneliti dan pengembang teknologi nuklir di Kelompok Riset Teknologi Pengelolaan Limbah Radioaktif khususnya Tim Geosains Lapangan PTLR 2019-2021 yang telah membantu penulis dalam melakukan penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. IAEA, "Borehole facilities for disposal of radioactive waste", *IAEA Safety Standards Series OS 335*, Vienna, Austria, 2005
- [2]. IAEA, "Safety standards of borehole disposal facilities for radioactive waste", *No. SSG-1*. IAEA, Vienna, Austria, 2009.
- [3]. Sucipta, "Tinjauan disposal limbah radioaktif PLTN di dunia dan potensi penerapannya di Indonesia," *Prosiding Seminar Nasional VIII SDM Teknologi Nuklir*, 2012, Yogyakarta.
- [4]. IAEA, "Safety case and safety assessment for the disposal of radioactive waste No. SSG-23", Vienna, Austria, 2012.
- [5]. Quintessa, "The borehole disposal concept scoping tool v2.0", United Kingdom, 2016.
- [6]. IAEA, "Siting of near surface disposal facilities," *Safety Series No. 111 G-3.1*, Vienna, Austria, 1994.
- [7]. Sucipta, "Optimasi penempatan disposal demo dalam lingkungan geologi di Kawasan Nuklir Serpong," *Jurnal Teknologi Pengolahan Limbah*, vol. 16 no. 2, 2013.
- [8]. PPGN, "Penyelidikan geologi teknik dan hidrogeologi tapak fasilitas demo plant PLLR di PPTN Serpong," PTLR BATAN, Serpong, 2010.
- [9]. Sucipta, "Geological and non-geological criteria of site for near surface disposal in Indonesia," *International Conference on Radioactive Waste Management: Solution for Sustainable Future*, IAEA, Vienna, Austria. 2021,
- [10]. H. Syaeful, and Sucipta, "Determination of hydraulic conductivity coefficient in NSD site Serpong based on in-situ permeability test method," *Eksplorium*, vol. 34, no. 1, Jakarta, 2013.
- [11]. E. Lubis, and Utara, "Migrasi ^{60}Co dan ^{137}Cs dalam tanah jenuh dan tak jenuh di PPTA Serpong," Hasil Penelitian PTPLR 1995/1996, PTPLR BATAN, Serpong, 1996.
- [12]. T.Turkandi, Sidarto, D.A. Agustiyanto, dan M.M.P. Hadiwidjoyo, "Peta geologi lembar jakarta dan kepulauan Seribu," P3G, Bandung, 1992.
- [13]. Kementerian PU, "Peta hazard gempa Indonesia," Kementerian Pekerjaan Umum, Jakarta, 2010.
- [14]. BMKG, "Data curah hujan UPTD Serpong, BMKG, Tangerang Selatan, 2020
- [15]. BPS Kota Tangerang Selatan, "Kota Tangerang Selatan dalam angka, 2022.
- [16]. IAEA, "BOSS: Borehole disposal of disused sealed sources – A technical

- manual, IAEA-TECDOC-1644, IAEA, Vienna, Austria, 2011.
- [17]. Sucipta and H. A. Pratama, "Planning and concept of borehole disposal technology for disposal of disused sealed radiation sources from using in health and industry," IOP Conf. Series: Journal of Physics, 2020.
- [18]. FAO, IAEA, ILO, NEA-OECD, PANAHO & WHO, "International basic safety standard for protection against ionizing radiation and for the safety of radiation sources," *Safety Series No. 115*, IAEA, Vienna, 1996.
- [19]. ICRP, "Radiation protection recommendation as applied to the disposal of long-lived solid radioactive waste," *ICRP Publication No. 81*, Pergamon, Oxford, 2000.
- [20]. BAPETEN, "Peraturan Kepala BAPETEN No. 7 Tahun 2013 tentang nilai batas radioaktivitas lingkungan," Jakarta, 2013.