

PENENTUAN TINGKAT KLERENS LIMBAH RADIOAKTIF HASIL SEMENTASI KONSENTRAT EVAPORASI DAN TINJAUAN KESELAMATAN PEMBUANGAN

DETERMINATION OF THE CLEARANCE LEVEL OF CEMENTED EVAPORATION CONCENTRATES RADIOACTIVE WASTE AND SAFETY REVIEW DISPOSAL

Suhartono¹, Noor Anis Kundari^{2,*}, Moch Romli¹, Sumarbagiono³

¹Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran - BRIN, KST BJ. Habibie, Serpong 15310

²Politeknik Teknologi Nuklir Indonesia - BRIN, Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 YKBB, Yogyakarta 55281

³Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif - BRIN, KST BJ. Habibie, Serpong 15310

*E-mail korespondensi: nooraniskundari@gmail.com / noor002@brin.go.id

Diterima 19 Maret 2023, diterima dalam bentuk perbaikan 20 Juni 2023, disetujui 24 Juni 2023

ABSTRAK

PENENTUAN TINGKAT KLERENS LIMBAH RADIOAKTIF HASIL SEMENTASI KONSENTRAT EVAPORASI DAN TINJAUAN KESELAMATAN PEMBUANGAN. Zat radioaktif terbuka, limbah radioaktif, atau material terkontaminasi/teraktivasi dapat dibebaskan dari pengawasan Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) melalui mekanisme klierens. Salah satu hasil olahan limbah radioaktif cair di Instalasi Pengelolaan Limbah Radioaktif, Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran, Badan Riset dan Inovasi Nasional (IPLR-DPFK BRIN) yang dapat diajukan penetapan klierens sebanyak 14 unit shell beton 950 L. Shell beton berisi hasil sementasi konsentrat evaporasi yang disementasi pada periode 1989-2002. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan hasil evaluasi karakteristik radioaktivitas meliputi laju paparan radiasi, tingkat kontaminasi permukaan, kandungan radionuklida, dan konsentrasi aktivitas radionuklida dalam agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi yang diduga telah mencapai tingkat klierens, serta memperoleh rumusan strategi pembuangan klierens terhadap shell beton 950 L beserta tinjauan keselamatan. Objek penelitian ini berupa 14 unit shell 950 L berbentuk silinder dengan diameter 140 cm dan tinggi 130 cm. Berdasarkan hasil identifikasi awal dan perhitungan telah mencapai tingkat klierens. Pengukuran laju dosis radiasi, tingkat kontaminasi permukaan, dan konsentrasi aktivitas radionuklida pemancar α , β , dan γ dilakukan untuk memastikan telah mencapai tingkat klierens. Berdasarkan hasil penelitian ini laju dosis tertinggi 0,15 $\mu\text{Sv/jam}$, tingkat kontaminasi permukaan tertinggi sebesar 0,0148 Bq/cm² untuk radionuklida pemancar α dan 0,0935 Bq/cm² untuk radionuklida pemancar β . Nilai tingkat klierens radioaktivitas diperoleh hasil berkisar antara 0,47020 – 0,66730. Berdasarkan Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 16/2012 tentang Tingkat Klierens, kandungan radionuklida dalam shell-shell beton 950 L yang diuji telah mencapai tingkat klierens. Pembuangan 14 unit shell beton tersebut dapat dilakukan melalui mekanisme klierens tak bersyarat karena dosis radiasi yang diterima kelompok kritis tidak melebihi 10 μSv per tahun dan tidak mengandung Bahan Berbahaya dan Beracun (B3). Unit shell beton tersebut akan dibuang melalui mekanisme klierens yang dapat dimanfaatkan sebagai struktur penyangga longsor akibat air hujan pada tanah miring di Kawasan Nuklir Serpong.

Kata kunci: klierens, tingkat klierens, kajian keselamatan, limbah radioaktif, shell beton, konsentrat evaporasi.

ABSTRACT

DETERMINATION OF THE CLEARANCE LEVEL OF CEMENTED EVAPORATION CONCENTRATES RADIOACTIVE WASTE AND SAFETY REVIEW DISPOSAL. Unsealed radioactive substances, radioactive waste, or contaminated/activated materials can be released from the control of the Nuclear Energy Regulation Agency (BAPETEN) through a clearance mechanism. One of the processed liquid radioactive waste products at the Radioactive Waste Management Installation, Directorate of Nuclear Facilities Management, National Research, and Innovation Agency (IPLR-DPFK BRIN) that may be proposed for clearance approval is 14 units of 950 L concrete shell evaporated concentrate cement. The concrete shell contains evaporated concentrate cement, cemented in 1989-2002. This study aims to obtain evaluation results of radioactivity characteristics, including radiation exposure rate, level of surface contamination, radionuclide content, and radionuclide activity concentrations contained in the concrete aggregate resulting from cemented evaporation concentrate, which is thought to have reached the clearance level, as well as obtaining a formulation of a clearance disposal strategy for the concrete shell 950 L and its safety overview. The object of this research was 14 units of 950 L cylinder shells with a diameter of 140 cm and a height of 130 cm. Based on the initial identification results and calculations, it had reached a clearance level. The measurements of the radiation dose rate, surface contamination level, and activity concentrations of α , β , and γ emitting radionuclides to ensure that the shell has reached the clearance level. The results showed that the highest dose rate was 0.15 $\mu\text{Sv/hour}$, the highest

surface contamination level was 0.0148 Bq/cm² for α emitting radionuclides and 0.0935 Bq/cm² for β emitting radionuclides. The radioactivity clearance level tested ranged from 0.47020 – 0.66730. Based on the Regulation of the Head of BAPETEN No. 16/2012 concerning the Clearance Level, the radionuclide content in the 950 L concrete shells tested has reached the clearance level. The disposal of 14 concrete shell units through an unconditional clearance mechanism because the radiation dose that a critical group will receive is less than 10 μ Sv per year, and the shells do not contain hazardous and toxic materials. They will be disposed of through a clearance mechanism which can be used as a support structure for landslides caused by rainwater on sloping ground in the Serpong Nuclear Area.

Keywords: clearance, clearance level, safety assessment, radioactive waste, concrete shell, evaporated concentrate.

PENDAHULUAN

Pengelolaan limbah radioaktif dari kegiatan penelitian, pengembangan, pengkajian, dan penerapan (litbangjirap) teknologi nuklir membutuhkan biaya yang tidak murah. Sebagai contoh untuk mengolah limbah radioaktif padat aktivitas rendah dan sedang pemancar β dan γ , diperlukan biaya Rp 2.500.000,- per drum 100 L. Demikian juga untuk limbah radioaktif cair aktivitas rendah dan sedang pemancar β dan γ , diperlukan biaya pengolahan sekitar Rp 5.000,- per liter [1]. Biaya-biaya tersebut belum termasuk biaya transportasi dan pengadaan wadah/kontainer misal drum baja 100 L, jerigen, dan drum HDPE.

Permasalahan lain yang cukup pelik dalam kegiatan pengelolaan limbah radioaktif di Instalasi Pengelolaan Limbah Radioaktif-Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran, Badan Riset dan Inovasi Nasional (IPLR-DPFK BRIN) yaitu kapasitas penyimpanan limbah radioaktif hampir penuh. IPLR-DPFK BRIN memiliki 2 gedung penyimpanan limbah radioaktif yaitu *Interim Storage 1* dan *Interim Storage 2* (IS 1 dan IS 2), 1 gedung Penyimpanan Sementara Limbah Aktivitas Tinggi (PSLAT), dan 1 Gedung/Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas (IPSB3). Namun akibat penambahan jumlah limbah radioaktif kegiatan litbangjirap teknologi nuklir menyebabkan kondisi gedung penyimpanan sementara limbah radioaktif IS 1 dan IS 2 menjadi hampir penuh [2].

Opsi membangun gedung penyimpanan limbah radioaktif yang baru (IS 3) untuk mengatasi masalah tersebut memerlukan waktu dalam hal pengadaan, terutama terkait perizinan dan pembiayaan. Oleh karena itu, diperlukan upaya dari seluruh pihak pemangku kepentingan, agar pengelolaan limbah radioaktif di IPLR-DPFK BRIN dapat berjalan efektif dan efisien. Upaya minimisasi limbah radioaktif harus diterapkan secara benar di instansi penimbun limbah, misal menerapkan konsep *exemption and clearance level* untuk mengontrol jumlah/volume limbah radioaktif yang ditimbulkan [3]. Limbah-limbah dari kegiatan litbangjirap teknologi nuklir perlu dilakukan pemilahan dengan benar berdasarkan karakteristik radioaktivitas sehingga limbah yang dikirim ke IPLR-DPFK BRIN, benar-benar limbah radioaktif dan tidak tercampur dengan limbah non radioaktif.

Untuk optimalisasi ruangan penyimpanan limbah radioaktif, IPLR-DPFK BRIN juga perlu menginventarisir limbah/paket hasil pengolahan limbah radioaktif yang masih termasuk rezim radioaktif sehingga harus disimpan di gudang limbah radioaktif. Limbah/paket limbah hasil pengolahan dengan potensi bahaya radiasi telah menjadi kecil atau dapat diabaikan, perlu diupayakan pembebasan dari kontrol pengawasan Badan Pengawas Tenaga Nuklir (BAPETEN) melalui mekanisme yang sah secara regulasi sehingga dapat dikeluarkan dari gudang penyimpanan limbah radioaktif. Ruang kosong yang ditinggalkan dapat diisi dengan limbah radioaktif/paket hasil olahan limbah radioaktif baru yang masih termasuk rezim radioaktif. Upaya ini dapat dilakukan dengan mengajukan klerens terhadap limbah radioaktif/paket limbah hasil olahan yang telah mencapai tingkat klerens ke BAPETEN. Penerapan konsep klerens pada kegiatan pengelolaan limbah radioaktif juga dapat memberikan keuntungan dari aspek ekonomi. Penerapan tingkat klerens limbah radioaktif padat praolah dapat menghemat biaya pengolahan limbah radioaktif sebesar 78% [4].

Klerens adalah pembebasan dari pengawasan BAPETEN terhadap zat radioaktif terbuka, limbah radioaktif, atau material terkontaminasi atau teraktivasi [5]. Tingkat Klerens adalah nilai yang ditetapkan oleh BAPETEN dan dinyatakan dalam konsentrasi aktivitas, pada atau di bawah nilai tersebut zat radioaktif terbuka, limbah radioaktif, atau material terkontaminasi atau teraktivasi dapat dibebaskan dari pengawasan [5]. Nilai tingkat klerens terhadap limbah radioaktif tergantung pada jenis kandungan radionuklida dan jenis limbah radioaktif. Tingkat klerens limbah radioaktif yang mengandung radionuklida buatan ditetapkan dalam Lampiran I Perka BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012 Tentang Tingkat Klerens. Sebagai contoh tingkat klerens radionuklida Cs-137 sebesar 0,1 Bq/g, Co-60 0,1 Bq/g, dan I-131 10 Bq/g. Tingkat klerens radionuklida alam ditetapkan dalam Lampiran II Perka BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012 Tentang Tingkat Klerens. Misal tingkat klerens radionuklida seri U-238 dalam benda berbentuk padat difuse sebanyak 0,3 Bq/g, radionuklida seri Th-232 dalam benda berwujud cair difuse sebanyak 1 Bq/L, dan K-40 dalam padatan difuse sebanyak 17 Bq/g [5].

Dalam pembuangan klierens zat radioaktif dikenal istilah klierens tak bersyarat (*unconditional clearance*) dan klierens bersyarat (*conditional clearance*). Klierens tak bersyarat diberlakukan untuk pembuangan klierens terhadap zat/limbah radioaktif yang konsentrasi aktivitas radionuklida sama atau di bawah tingkat klierens yang telah ditetapkan. Dosis radiasi yang berpotensi diterima oleh masyarakat kelompok kritis (*representative person*) akibat pembuangan obyek klierens tak bersyarat diperkirakan tidak akan melebihi 10 μSv (sepuluh mikrosievert) per tahun [6].

Ketentuan klierens bersyarat diberlakukan untuk pembuangan klierens terhadap zat radioaktif yang memiliki konsentrasi aktivitas radionuklida di atas tingkat klierens. Contoh skenario penerapan pembuangan limbah radioaktif dengan mekanisme klierens bersyarat yang pernah dilaporkan seperti penggunaan bongkaran limbah radioaktif untuk bahan struktur jalan raya [7]. Ketentuan klierens bersyarat di Indonesia telah ditetapkan dalam Pasal 11 Perka BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012. Pemohon atau pemegang izin dapat mengajukan penetapan klierens yang nilainya lebih tinggi dari tingkat klierens yang ditetapkan dalam Lampiran I dan II Perka BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012 kepada Kepala BAPETEN dengan syarat: a. melakukan analisis skenario paparan radiasi; dan b. hasil perhitungan dosis efektif terhadap kelompok kritis (*representative person*) tidak melebihi 100 μSv (seratus mikrosievert) dalam 1 (satu) tahun [5].

Salah satu jenis limbah radioaktif di IPLR-DPFK BRIN dengan radioaktivitas rendah, mencapai tingkat klierens dan memungkinkan diajukan penetapan klierens ke BAPETEN pada tahun 2022 yaitu hasil sementasi konsentrat evaporasi periode tahun 1989-2002. Terdapat 17 unit shell beton 950 L yang dihasilkan dari proses sementasi konsentrat evaporasi pada periode pengolahan 1989 – 2002 di IPLR-DPFK BRIN [8]. Akan tetapi, berdasarkan perhitungan awal, hanya 14 unit shell beton yang telah mencapai tingkat klierens. Sampai saat ini, di Indonesia belum ada penelitian tingkat klierens limbah radioaktif berupa agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi. Penelitian terdahulu yang pernah dilaporkan yaitu pengukuran tingkat klierens beton hasil dekomisioning fasilitas pemrosesan uranium di Jepang [9]. Asal-usul limbah, jenis, bentuk limbah radioaktif, dan kandungan radionuklida dalam obyek klierens yang diukur sangat berbeda.

Kebaruan utama dari penelitian ini yaitu obyek penelitian yang berupa agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi limbah radioaktif cair yang menyatu dan berada di dalam wadah/kontainer *shell* beton 950 L berbentuk silinder dengan diameter 140 cm dan tinggi 130 cm. Tingkat klierens radioaktivitas untuk material seperti ini harus dipastikan dengan parameter konsentrasi aktivitas (bersatuan Bq/g), sehingga memerlukan pengambilan cuplikan agregat beton dengan teknik *coring*. Karakteristik radioaktivitas unit *shell* beton 950 L yang dapat diukur pada penelitian ini berupa laju dosis radiasi dan tingkat kontaminasi permukaan, sedangkan terhadap cuplikan agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi dilakukan pengukuran parameter berupa laju dosis radiasi, tingkat kontaminasi permukaan, dan konsentrasi aktivitas radionuklida pemancar α , β , dan γ .

Tujuan penelitian ini untuk mendapatkan hasil evaluasi karakteristik radioaktivitas meliputi laju paparan radiasi, tingkat kontaminasi permukaan, kandungan radionuklida, dan konsentrasi aktivitas radionuklida yang terdapat dalam agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi yang diduga telah mencapai tingkat klierens dan memperoleh rencana strategi pembuangan klierens terhadap shell-shell beton 950 L yang berisi agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi beserta tinjauan keselamatan.

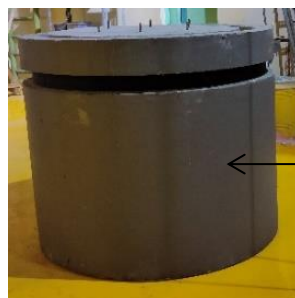
Manfaat yang dapat diperoleh dari hasil penelitian ini antara lain diperoleh data tingkat radioaktivitas terkini dari paket hasil olahan limbah radioaktif cair sebanyak 14 unit *shell* beton 950 L. Data tersebut dapat digunakan sebagai dasar untuk mengajukan penetapan klierens ke BAPETEN. Penelitian ini juga dapat digunakan sebagai umpan balik kemampuserapan peraturan BAPETEN terkait klierens zat radioaktif. Selain itu, manfaat penelitian ini yang tidak kalah penting yaitu peningkatan kompetensi sumber daya manusia terkait implementasi klierens limbah radioaktif yang praktek penerapannya di Indonesia sangat sedikit.

METODOLOGI

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sejumlah 14 unit *shell* beton 950 L hasil pengolahan limbah radioaktif cair secara evaporasi – sementasi, yang dilakukan pengolahan pada periode 1989 – 2002. Pada tahun 2022, radioaktivitas bahan ini diperkirakan telah meluruh sehingga mencapai tingkat klierens digunakan sebagai objek penelitian. Selain itu, tidak diperlukan bahan spesifik, kecuali adonan semen kualitas K-500 untuk melakukan *seal* ulang pada tutup *shell* beton 950 L yang dibuka untuk pengambilan cuplikan agregat beton.

Objek penelitian berupa shell beton 950 L yang berdiameter 140 cm dan tinggi 130 cm, berisi agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi milik IPLR-DPFK BRIN. Agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi limbah radioaktif cair berupa material homogen yang terbentuk dari campuran antara konsentrat limbah radioaktif cair, semen, pasir, dan air. Agregat setiap unit *shell* terbentuk dari campuran 235 L konsentrat evaporasi limbah radioaktif cair, 600 kg semen, 400 kg pasir, dan 150 L air yang diaduk homogen dengan kecepatan putaran

pengadukan 1435 rpm selama kurang lebih 60 menit [10]. Agregat beton hasil sementasi konsentrat ini memiliki kekuatan tekan $2,90 - 3,03 \text{ kN/cm}^2$ dan densitas antara $2,38 - 2,42 \text{ g/cm}^3$ [11]. Radionuklida dan nuklida stabil hasil peluruhan menyatu dan terikat kuat dalam padatan homogen yang terbentuk. Gambar 1 menunjukkan unit *shell* beton 950 L, sedangkan Gambar 2 menunjukkan isi satu unit *shell* berupa agregat beton.



Shell beton 950 L berwujud silinder tertutup, tinggi 130 cm dan diameter 140 cm [12]

Gambar 1. Unit *shell* beton 950 L



Agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi

Shell beton 950 L

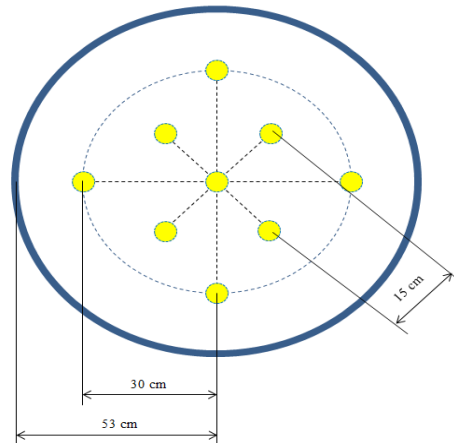
Gambar 2. Agregat beton hasil sementasi konsentrat

Peralatan yang digunakan meliputi *forklift* sebagai alat angkat-angkut *shell* beton 950 L, unit *coring drill* diameter 3" untuk mencuplik agregat beton, alat ukur radiasi *portable* (surveimeter beta gamma, monitor kontaminasi *portable* dan dosimeter digital), alat pengolah cuplikan (gergaji mesin pemotong beton, penggerus butiran, penyaring mikro/*sieve shaker*), dan alat ukur radioaktivitas (α/β *Sample Counter*, *Gross Alpha-Beta Counter*, dan spektrometer gamma).

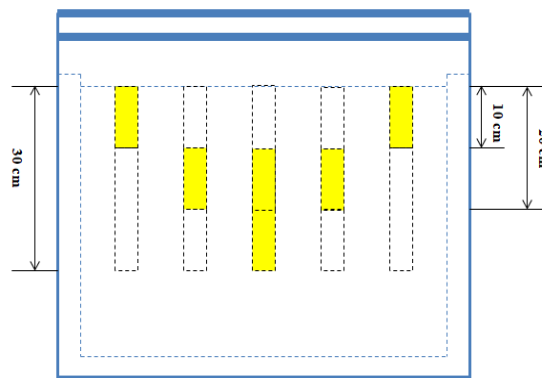
Penelitian ini diawali dengan persiapan administrasi untuk mendapatkan ijin pengambilan objek penelitian. Setelah diidentifikasi, keempat belas *shell* beton 950 L ini diangkut dengan *forklift* lalu dibawa ke lokasi pengukuran untuk diukur laju paparan radiasi dan tingkat kontaminasi. Pengukuran laju paparan dilakukan terhadap keempat belas unit *shell* beton 950 L pada sisi bagian samping (keliling) *shell* beton yang dibagi menjadi 4 area. Pada setiap area diukur 3 titik laju paparan radiasi kontak permukaan dan jarak 1 m. Titik-titik pengukuran tersebut merupakan titik bagian bawah pada ketinggian 30 cm, titik bagian tengah pada ketinggian 70 cm, dan titik bagian atas dengan ketinggian 100 cm dari dasar. Pada sisi bagian atas (tutup) *shell* beton 950 L dibagi menjadi 2 area pengukuran laju paparan radiasi. Teknik pengukuran laju paparan radiasi permukaan luar *shell* beton 950 L menggunakan SOP Pemantauan Laju Dosis Radiasi yang berlaku di IPLR-DPFG BRIN [13].

Tingkat kontaminasi permukaan diukur dengan metode tidak langsung, menggunakan teknik uji usap (*smear test*). Permukaan luar *shell* beton 950 L dibagi menjadi 4 area pengukuran di sisi bagian samping (keliling), dan 2 area pengukuran di sisi bagian atas. Kertas usap diusapkan pada masing-masing area pengukuran, selanjutnya kertas tersebut dicacah tingkat kontaminasi menggunakan α/β *Sample Counter*. Teknik pengukuran tingkat kontaminasi permukaan ini dilakukan dengan mengikuti SOP Sampling Kontaminasi Permukaan, SOP Pemantauan Kontaminasi Permukaan, dan SOP Pengoperasian α/β *Sample Counter* milik IPLR-DPFG BRIN [14].

Setelah dilakukan pengukuran tingkat kontaminasi permukaan terhadap 14 unit *shell*, dipilih 6 unit *shell* berdasarkan perbedaan tanggal/waktu proses sementasi dan nilai konsentrasi aktivitas radionuklida lebih besar dari lainnya. Keenam unit *shell* beton 950 L tersebut dibuka, kemudian diukur laju paparan radiasi dan tingkat kontaminasi permukaan agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi. Teknik pengukuran laju dosis dan tingkat kontaminasi agregat beton menggunakan metode yang sama dengan pengukuran permukaan *shell* beton. Setelah itu, dilakukan pengambilan cuplikan dari agregat beton dengan cara dibor dengan unit *coring drill* berdiameter 3". Cuplikan ini digunakan untuk menentukan konsentrasi aktivitas radionuklida pemancar α , β , dan γ . Gambar 3 menunjukkan sketsa titik lokasi pencuplikan, sedangkan Gambar 4 menunjukkan sketsa kedalaman pencuplikan agregat beton. Metode pengambilan cuplikan menggunakan acuan IAEA dan SB 014 BATAN [15], [16].



Gambar 3. Titik-titik lokasi pencuplikan agregat beton



Gambar 4. Kedalaman pencuplikan agregat beton

Masing-masing cuplikan yang berbentuk silinder digerus halus, dicampur, dan disaring menggunakan *sieve shaker* ukuran 200 mesh. Pengukuran konsentrasi aktivitas radionuklida pemancar *alpha* dan *beta* dilakukan menggunakan *Gross Alpha-Beta Counter*, sedangkan konsentrasi aktivitas radionuklida pemancar *gamma* (γ) diukur menggunakan spektrometer γ . Setelah pengukuran selesai, lubang bekas pengambilan cuplikan ditutup kembali menggunakan adonan semen K-500.

Laju paparan radiasi, tingkat kontaminasi permukaan, dan konsentrasi aktivitas radionuklida agregat beton pada *shell* beton yang tidak dibuka (8 buah *shell* beton 950 L) dianalogikan dengan data hasil pengukuran karakteristik radioaktivitas *shell* beton sampel (6 buah *shell* beton 950 L) berdasarkan laju paparan radiasi, tingkat kontaminasi permukaan luar masing-masing *shell* beton, dan estimasi konsentrasi aktivitas radionuklida dari perhitungan. Setelah semua data lapangan didapatkan, selanjutnya diolah dan dilakukan evaluasi hasil. Data dibandingkan dengan ketentuan tingkat klierens mengacu Perka BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012. Pada tahapan ini akan didapatkan kesimpulan apakah tingkat radioaktivitas agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi telah memenuhi tingkat klierens.

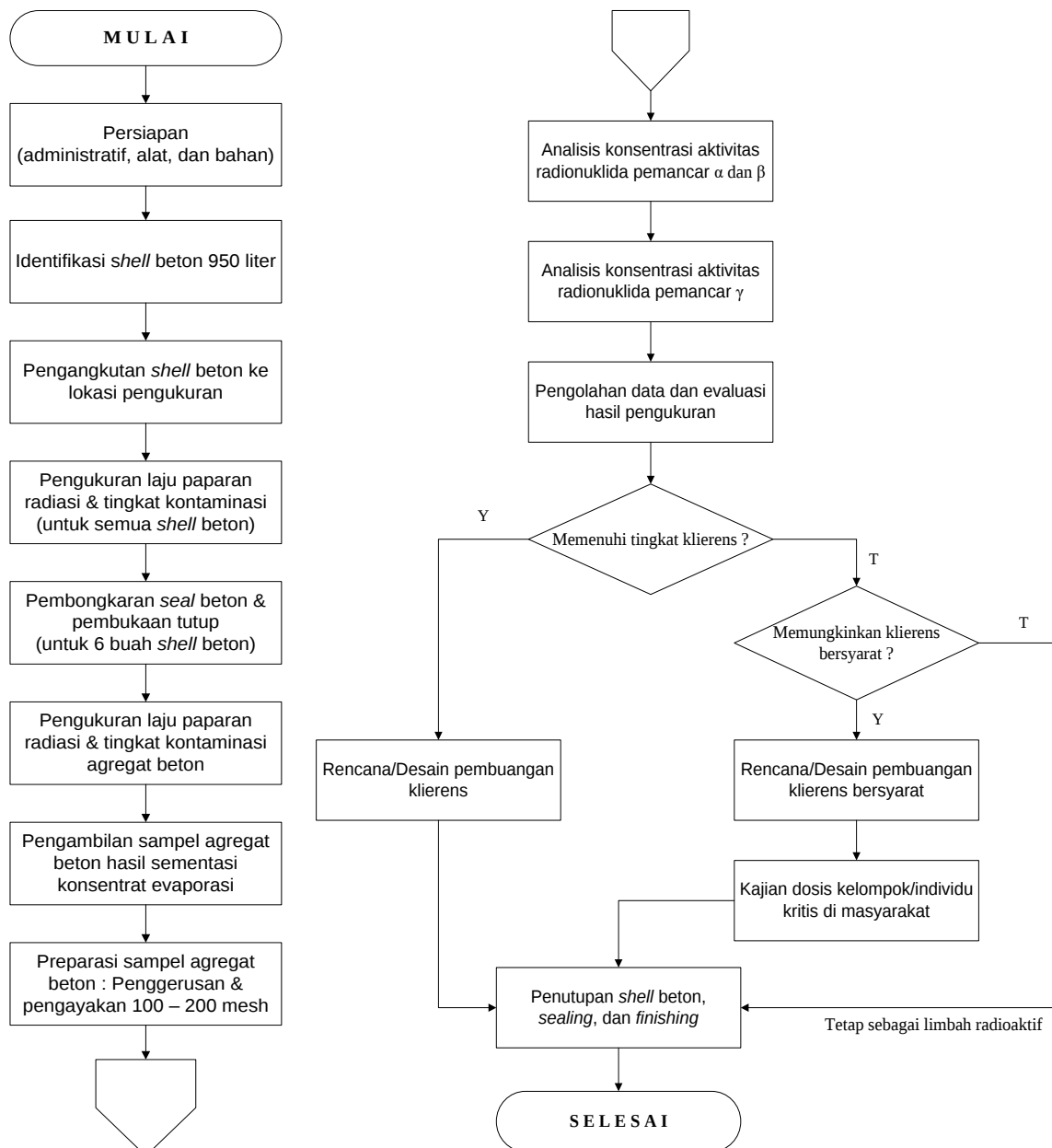
Berdasarkan pengolahan data dan evaluasi hasil pengukuran, dapat diketahui konsentrasi aktivitas radionuklida dalam setiap agregat *shell* beton dibandingkan dengan pemenuhan tingkat klierens. Untuk obyek klierens yang mengandung radionuklida lebih dari satu, penentuan tingkat klierens dihitung menggunakan Persamaan (1) [5].

$$\sum_{i=1}^n \frac{C_i}{(\text{Konsentrasi aktivitas})_i} \leq 1 \quad (1)$$

dengan C_i merupakan konsentrasi dari radionuklida i dalam campuran radionuklida laju reaksi rata-rata dalam satuan (Bq/g), $(\text{Konsentrasi aktivitas})_i$ merupakan nilai konsentrasi aktivitas untuk radionuklida i sebagaimana tercantum dalam Lampiran Perka BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012 dan n merupakan Jumlah radionuklida buatan yang terdapat dalam campuran radionuklida.

Jika seluruh sampel menunjukkan tingkat radioaktivitas agregat beton telah memenuhi tingkat klierens, selanjutnya dapat dibuat rencana pembuangan klierens tak bersyarat (*unconditional clearance*). Jika sebagian sampel menunjukkan tingkat radioaktivitas agregat beton masih di atas tingkat klierens, maka dibuat rencana pembuangan klierens bersyarat (*conditional clearance*) beserta kajian potensi penerimaan dosis radiasi oleh kelompok/individu kritis di masyarakat sesuai Perka BAPETEN Nomor 16 Tahun 2012.

Secara ringkas, tahap-tahap penelitian disajikan dalam bentuk diagram alir pada Gambar 5.



Gambar 5. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Radioaktivitas Unit Shell Beton 950 L

Sebanyak 17 unit *shell* beton 950 L hasil proses sementasi pada periode 1989 – 2002, diperkirakan terdapat 14 unit *shell* beton dengan radioaktivitas telah mencapai tingkat klierens. Namun radioaktivitas 3 unit *shell* beton lainnya belum mencapai tingkat klierens [8]. Karakteristik radioaktivitas unit *shell* beton 950 L berupa laju dosis radiasi, tingkat kontaminasi permukaan diukur secara langsung, dan tingkat kontaminasi permukaan bersifat *removable*. Tabel 1 sampai dengan Tabel 3 menunjukkan data hasil pengukuran karakteristik radioaktivitas 14 unit *shell* beton 950 L diduga kandungan radionuklida telah mencapai tingkat klierens. Rangkuman data hasil pengukuran laju dosis radiasi disajikan dalam Tabel 1.

Berdasarkan data pada Tabel 1 diketahui bahwa laju dosis radiasi permukaan *shell* beton 950 L nilainya sangat kecil dan relatif sama dengan laju dosis latar (*background*) bernilai 0,13 $\mu\text{Sv/jam}$. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi aktivitas radionuklida dalam *shell* beton tersebut sangat kecil. Laju dosis radiasi yang rendah, merata di seluruh permukaan baik sisi samping ataupun sisi atas. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi radionuklida cukup homogen.

Tabel 1. Data hasil pengukuran laju dosis radiasi pada permukaan 14 unit *shell* beton 950 L

Nomor <i>Shell</i> Beton	Laju Dosis Radiasi ($\mu\text{Sv/jam}$)		
	Terendah	Tertinggi	Rata-rata
1 A	0,12	0,14	0,13
2 A	0,12	0,15	0,13
3 A	0,12	0,14	0,13
4 A	0,12	0,15	0,13
5 A	0,12	0,15	0,13
6 A	0,12	0,14	0,13
7 A	0,12	0,14	0,13
10 A	0,12	0,14	0,13
11 A	0,12	0,15	0,13
12 A	0,12	0,14	0,13
13 A	0,12	0,14	0,13
14 A	0,12	0,15	0,13
15 A	0,12	0,15	0,13
16 A	0,12	0,15	0,13

Keterangan: Laju dosis radiasi latar rata-rata 0,13 $\mu\text{Sv/jam}$

Hasil pengukuran tingkat kontaminasi permukaan *shell* beton disajikan dalam Tabel 2. Pengukuran dilakukan secara langsung menggunakan monitor kontaminasi *portable*. Hasil pengukuran menunjukkan tingkat kontaminasi zat radioaktif keseluruhan, baik yang bersifat kontaminan tetap ataupun kontaminan dapat berpindah (*removable*).

Tabel 2. Data hasil pengukuran tingkat kontaminasi permukaan *shell* beton 950 L secara langsung

Nomor <i>Shell</i> Beton	Kontaminasi Permukaan (Bq/cm^2)					
	Terendah		Tertinggi		Rata-rata per <i>shell</i>	
	α	β	α	β	α	β
1 A	<LoD	ttd	0,0066	0,0170	0,0042	0,0128
2 A	0,0025	0,0170	0,0107	0,0765	0,0077	0,0461
3 A	<LoD	0,0255	0,0148	0,0935	0,0078	0,0638
4 A	<LoD	0,0255	0,0107	0,0850	0,0053	0,0644
5 A	0,0025	0,0340	0,0107	0,0935	0,0057	0,0710
6 A	0,0025	0,0085	0,0107	0,0935	0,0063	0,0638
7 A	0,0025	0,0510	0,0148	0,0935	0,0089	0,0759
10 A	<LoD	0,0340	0,0148	0,0850	0,0049	0,0577
11 A	0,0025	0,0255	0,0107	0,0765	0,0066	0,0577
12 A	0,0025	0,0255	0,0148	0,0935	0,0074	0,0688
13 A	<LoD	0,0170	0,0107	0,0765	0,0043	0,0516
14 A	0,0025	0,0340	0,0148	0,0935	0,0089	0,0644
15 A	0,0025	0,0170	0,0107	0,0850	0,0066	0,0559
16 A	<LoD	0,0170	0,0148	0,0935	0,0064	0,0595

Keterangan <LoD = di bawah limit deteksi

Berdasarkan nilai kontaminasi permukaan dalam Tabel 2, dapat dinyatakan bahwa nilai-nilai tingkat kontaminasi permukaan tersebut sangatlah kecil. Tingkat kontaminasi radionuklida pemancar α tertinggi sebanyak 0,0148 Bq/cm^2 . Tingkat kontaminasi radionuklida pemancar β tertinggi sebanyak 0,0935 Bq/cm^2 . Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 58 Tahun 2015 tentang Keselamatan Radiasi dan Keamanan dalam Pengangkutan Zat Radioaktif menjelaskan bahwa Benda Terkontaminasi Permukaan adalah benda padat yang tidak radioaktif tetapi terdapat zat radioaktif yang tersebar pada permukaan dalam jumlah yang melebihi 0,4 Bq/cm^2 untuk pemancar beta, gamma, dan pemancar alfa toksitas rendah, atau 0,04 Bq/cm^2 untuk pemancar alfa lainnya [17]. Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa permukaan-permukaan *shell* beton 950 L yang diukur tidak terkontaminasi zat radioaktif.

Tabel 3 menunjukkan hasil pengukuran tingkat kontaminasi permukaan yang bersifat *removable* pada 14 unit *shell* beton 950 L. Tingkat kontaminasi permukaan yang bersifat *removable* menunjukkan keberadaan zat radioaktif di sisi luar permukaan unit *shell* beton 950 L yang memungkinkan berpindah mengkontaminasi benda lain yang bersinggungan dengan unit *shell* beton.

Tabel 3. Data tingkat kontaminasi *removable* pada *shell* beton 950 L

Nomor <i>Shell</i> Beton	Kontaminasi Permukaan (Bq/cm ²)					
	Terendah		Tertinggi		Rata-rata per <i>shell</i>	
	α	β	α	β	α	β
1 A	0,0020	0,0002	0,0035	0,0115	0,0028	0,0108
2 A	0,0007	0,0011	0,0046	0,0146	0,0028	0,0066
3 A	0,0022	0,0013	0,0040	0,0113	0,0031	0,0047
4 A	0,0024	<LoD	0,0042	0,0095	0,0035	0,0043
5 A	0,0018	<LoD	0,0057	0,0101	0,0040	0,0034
6 A	0,0035	0,0011	0,0051	0,0110	0,0043	0,0061
7 A	0,0018	0,0055	0,0062	0,0165	0,0048	0,0108
10 A	0,0015	0,0043	0,0042	0,0142	0,0030	0,0071
11 A	0,0020	<LoD	0,0073	0,0099	0,0041	0,0042
12 A	0,0026	0,0060	0,0070	0,0159	0,0044	0,0096
13 A	0,0035	<LoD	0,0073	0,0079	0,0059	0,0034
14 A	0,0015	0,0044	0,0042	0,0144	0,0031	0,0073
15 A	0,0026	0,0043	0,0058	0,0133	0,0042	0,0086
16 A	0,0026	0,0044	0,0062	0,0135	0,0045	0,0097

Keterangan: <LoD = di bawah limit deteksi

Berdasarkan Tabel 3, didapatkan tingkat kontaminasi permukaan *removable* pada 14 unit *shell* beton 950 L sangat rendah. Untuk kontaminan radionuklida pemancar α , nilai tertinggi sebesar 0,0073 Bq/cm². Nilai tertinggi tingkat kontaminasi radionuklida pemancar β yaitu 0,0165 Bq/cm². Mengacu pada PP Nomor 58 Tahun 2015 tentang Keselamatan Radiasi dan Keamanan dalam Pengangkutan Zat Radioaktif [17], maka dapat dinyatakan bahwa 14 unit *shell* beton 950 L tidak terkontaminasi zat radioaktif yang bersifat *removable*. Rangkuman data hasil pengukuran karakteristik radioaktivitas unit *shell* beton 950 L seperti ditunjukkan pada Tabel 1 sampai dengan Tabel 3 menunjukkan bahwa tingkat radioaktivitas 14 unit *shell* beton tersebut sangat rendah karena relatif sama dengan radioaktivitas latar (*background*).

Karakteristik Radioaktivitas Agregat Beton Hasil Sementasi Konsentrat Evaporasi

Karakteristik radioaktivitas agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi yang diukur meliputi laju dosis radiasi, tingkat kontaminasi permukaan diukur secara langsung, tingkat kontaminasi permukaan yang bersifat *removable*, dan konsentrasi aktivitas radionuklida pemancar α , β , dan γ . Tabel 4 sampai dengan Tabel 7 menunjukkan data hasil pengukuran karakteristik radioaktivitas agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi dari 6 unit *shell* beton telah dipilih berdasarkan pada perbedaan tanggal/waktu proses sementasi memiliki nilai konsentrasi aktivitas radionuklida yang lebih besar.

Tabel 4. Data hasil pengukuran laju dosis radiasi agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi

Nomor <i>Shell</i> Beton	Laju Dosis Radiasi (μ Sv/jam)		
	Terendah	Tertinggi	Rata-rata
3 A	0,12	0,15	0,13
6 A	0,13	0,16	0,15
7 A	0,12	0,16	0,14
12 A	0,12	0,15	0,14
14 A	0,12	0,15	0,13
16 A	0,13	0,16	0,15

Keterangan: Laju dosis radiasi latar rata-rata 0,13 μ Sv/jam

Berdasarkan data pada Tabel 4 diketahui bahwa laju dosis radiasi agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi terendah 0,12 μ Sv/jam, tertinggi 0,16 μ Sv/jam, dan laju dosis radiasi rata-rata 0,14 μ Sv/jam. Nilai laju dosis radiasi agregat beton tersebut relatif sama dengan laju dosis radiasi latar (*background*) 0,13 μ Sv/jam. Hal ini menunjukkan bahwa sisa aktivitas radionuklida dalam agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi sangat rendah.

Tabel 5. Data tingkat kontaminasi permukaan agregat beton yang diukur secara langsung

Nomor Shell Beton	Kontaminasi Permukaan (Bq/cm ²)					
	Terendah		Tertinggi		Rata-rata per shell	
	α	β	α	β	α	β
3 A	0,0066	0,3060	0,0271	0,3655	0,0193	0,3343
6 A	0,0025	0,0765	0,0230	0,2210	0,0134	0,1521
7 A	<LoD	0,1955	0,0230	0,3910	0,0118	0,3315
12 A	0,0107	0,3315	0,0271	0,3740	0,0189	0,3627
14 A	<LoD	0,1105	0,0230	0,3825	0,0078	0,3287
16 A	<LoD	0,3485	0,0066	0,3825	0,0036	0,3664

Keterangan: <LoD = di bawah limit deteksi

Berdasarkan data pada Tabel 5 diketahui bahwa tingkat kontaminasi alpha (α) pada agregat beton tertinggi 0,0271 Bq/cm². Tingkat kontaminasi beta (β) pada permukaan agregat beton tertinggi 0,3910 Bq/cm². Nilai-nilai tingkat kontaminasi permukaan tersebut relatif kecil. Berdasarkan PP Nomor 58 Tahun 2015 tentang Keselamatan Radiasi dan Keamanan dalam Pengangkutan Zat Radioaktif, Benda Terkontaminasi Permukaan adalah benda padat yang tidak radioaktif tetapi terdapat zat radioaktif yang tersebar pada permukaan dalam jumlah yang melebihi 0,4 Bq/cm² untuk pemancar beta, gamma, dan pemancar alfa toksisitas rendah, atau 0,04 Bq/cm² untuk pemancar alfa lainnya [17]. Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa permukaan-permukaan agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi yang diukur tidak terkontaminasi zat radioaktif.

Parameter penting yang perlu ditentukan yaitu tingkat kontaminan yang bersifat *removable*. Hasil pengukuran tingkat kontaminan bersifat *removable* pada agregat beton disajikan dalam Tabel 6.

Tabel 6. Hasil pengukuran tingkat kontaminan bersifat *removable* pada agregat beton

Nomor Shell Beton	Kontaminasi Permukaan (Bq/cm ²)					
	Terendah		Tertinggi		Rata-rata per shell	
	α	β	α	β	α	β
3 A	0,0040	0,0063	0,0099	0,0121	0,0049	0,0095
6 A	0,0027	<LoD	0,0049	0,0022	0,0041	0,0006
7 A	0,0024	<LoD	0,0062	0,0095	0,0047	0,0030
12 A	0,0022	<LoD	0,0055	0,0128	0,0039	0,0041
14 A	0,0026	<LoD	0,0071	0,0095	0,0046	0,0049
16 A	0,0033	<LoD	0,0069	0,0117	0,0047	0,0045

Keterangan: <LoD = di bawah limit deteksi

Berdasarkan data dalam Tabel 6 didapatkan tingkat kontaminan *removable* pada permukaan agregat beton hasil sementasi konsentrat sangat rendah. Untuk kontaminan radionuklida pemancar α , nilai tertinggi 0,0099 Bq/cm² dan nilai tertinggi kontaminan radionuklida pemancar β 0,0128 Bq/cm². Berdasarkan data dalam Tabel 6, juga diketahui bahwa tidak terdapat *hotspots* tingkat kontaminasi permukaan *removable*. Hal ini menunjukkan bahwa distribusi radionuklida tersisa di dalam agregat beton cukup merata. Mengacu definisi benda terkontaminasi permukaan sesuai PP 58 Tahun 2015 tentang Keselamatan Radiasi dan Keamanan dalam Pengangkutan Zat Radioaktif, Benda Terkontaminasi Permukaan adalah benda padat yang tidak radioaktif tetapi terdapat zat radioaktif yang tersebar pada permukaan dalam jumlah yang melebihi 0,4 Bq/cm² untuk pemancar beta, gamma, dan pemancar alfa toksisitas rendah, atau 0,04 Bq/cm² untuk pemancar alfa lainnya [17]. Dengan demikian, dapat dinyatakan bahwa agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi tidak terkontaminasi zat radioaktif yang bersifat *removable*.

Selain parameter laju dosis radiasi dan tingkat kontaminasi, parameter radioaktivitas penting untuk menentukan tingkat klerens zat/limbah radioaktif yaitu konsentrasi aktivitas radionuklida. Tabel 7 menunjukkan hasil pengukuran konsentrasi aktivitas radionuklida pada cuplikan agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi dari 6 unit *shell* beton 950 L.

Pengukuran konsentrasi aktivitas radionuklida pemancar α dan β dilakukan secara *gross* karena pada saat penelitian dilakukan tidak terdapat laboratorium di BRIN yang dapat menganalisis radioaktivitas α dan β sampel agregat beton secara spektrometri. Radionuklida pemancar γ yang terdeteksi dalam sampel agregat beton yaitu Cs-137. Konsentrat evaporasi di fasilitas IPLR-DPFK BRIN berasal dari limbah radioaktif cair aktivitas sedang reaktor serbaguna G.A. Siwabessy. Radionuklida dominan dalam limbah radioaktif cair tersebut berupa Zn-65, Co-60, dan Cs-137 [18]. Radionuklida lain mungkin ada dalam konsentrat evaporasi (Zn-65, Co-60, dan

radionuklida lain yang memiliki waktu paruh relatif pendek) radioaktivitasnya telah meluruh menjadi sangat kecil dan tidak terdeteksi menggunakan spektrometer gamma.

Tabel 7. Konsentrasi aktivitas radionuklida pemancar α , β , dan γ dalam agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi limbah radioaktif cair

Nomor <i>Shell</i> Beton	Konsentrasi aktivitas (Bq/g)		
	Gross α	Gross β	γ (Cs-137)
3 A	0,00609 $\pm$ 0,00188	0,05390 $\pm$ 0,00245	*)
6 A	0,00463 $\pm$ 0,00178	0,04470 $\pm$ 0,00222	*)
7 A	0,00682 $\pm$ 0,00193	0,03940 $\pm$ 0,00209	*)
12 A	0,00682 $\pm$ 0,00193	0,04190 $\pm$ 0,00215	0,00787 $\pm$ 0,00079
14 A	0,00584 $\pm$ 0,00186	0,03600 $\pm$ 0,00200	0,00572 $\pm$ 0,00054
16 A	0,00755 $\pm$ 0,00198	0,03820 $\pm$ 0,00206	0,02098 $\pm$ 0,00211

Keterangan : *) = Di bawah konsentrasi terendah yang dapat dideteksi
Konsentrasi terendah yang dapat dideteksi = 0,00080 Bq/g

Berdasarkan Tabel 7 diduga kandungan radionuklida tersisa dalam agregat beton merupakan campuran dari radionuklida pemancar α , radionuklida pemancar β , dan radionuklida pemancar γ (Cs-137). Oleh karena itu, tingkat klierens dari unit *shell* beton 950 L yang diukur, dihitung menggunakan Persamaan (1). Nilai C_i yaitu konsentrasi (Bq/g) dari radionuklida i dalam campuran radionuklida diperoleh dari data hasil penelitian. Nilai (*Konsentrasi aktivitas*) $_i$ yaitu nilai konsentrasi aktivitas untuk radionuklida i sebagaimana tercantum dalam tabel pada Lampiran Perka BAPETEN No. 16 Tahun 2012.I. Namun, karena radioaktivitas α dan β dari penelitian diukur secara gross, maka (*Konsentrasi aktivitas*) $_{\alpha}$ dan (*Konsentrasi aktivitas*) $_{\beta}$ ditentukan 0,1 Bq/g sesuai ketentuan Pasal 8 Perka BAPETEN No. 16 Tahun 2012 yang menyatakan bahwa "Dalam hal jenis radionuklida buatan dan alam tidak dapat diidentifikasi, Tingkat Klierens ditetapkan lebih kecil atau sama dengan 0,1 Bq/g atau 0,1 Bq/cm²". Dengan memasukkan data-data pengukuran pada Tabel 7 ke dalam Persamaan (1), maka akan diketahui radioaktivitas unit *shell* beton 950 L telah mencapai tingkat klierens atau belum. Hasil perhitungan tingkat klierens dari 6 unit *shell* beton yang diukur ditunjukkan pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil perhitungan klierens *shell* beton 950 L

Nomor <i>Shell</i> Beton	$C_i/(Konsentrasi\ aktivitas)$				Klierens/ Tidak
	α	β	Cs-137	$\sum_{i=1}^3 C_i/(KA)_i$	
3 A	0,06090	0,53900	0,00800	0,61600	Klierens
6 A	0,04630	0,44700	0,00800	0,50130	Klierens
7 A	0,06820	0,39400	0,00800	0,47020	Klierens
12 A	0,06820	0,41900	0,07870	0,56590	Klierens
14 A	0,05840	0,36000	0,05720	0,47560	Klierens
16 A	0,07550	0,38200	0,20980	0,66730	Klierens

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 8, dapat diketahui bahwa radioaktivitas paket hasil olahan limbah radioaktif cair berupa 6 unit *shell* beton 950 L telah mencapai tingkat klierens. Untuk 8 unit *shell* beton 950 L yang lain, dengan mempertimbangkan perhitungan/dugaan tingkat klierens berdasarkan aktivitas radionuklida dalam konsentrat mula-mula dan kesamaan karakteristik radioaktivitas *shell* beton seperti ditunjukkan pada Tabel 1 sampai dengan Tabel 3, maka dapat dinyatakan bahwa 8 unit *shell* beton 950 L tersebut kemungkinan besar telah mencapai tingkat klierens. Dengan demikian, unit *shell* beton 950 L dengan radioaktivitas telah mencapai tingkat klierens berjumlah 14 unit.

Tinjauan Keselamatan Pembuangan Klierens 14 Unit *Shell* Beton 950 L

Pembuangan limbah radioaktif melalui mekanisme klierens dapat dilakukan secara langsung dibuang ke lokasi pembuangan limbah atau dimanfaatkan untuk tujuan tertentu [19], [20]. Pasal 22 Undang-Undang Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran menyebutkan bahwa "Pengelolaan limbah radioaktif dilaksanakan untuk mencegah timbulnya bahaya radiasi terhadap pekerja, anggota masyarakat, dan lingkungan hidup" [21]. Pembuangan klierens terhadap paket hasil olahan limbah radioaktif berupa *shell* beton 950 L berisi agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi harus memperhatikan faktor keselamatan baik keselamatan radiasi ataupun keselamatan non radiasi. Hal tersebut dilakukan untuk menjamin keselamatan pekerja, anggota masyarakat, dan lingkungan hidup.

Potensi bahaya non radiasi dari pembuangan klierens paket hasil olahan limbah radioaktif yang perlu menjadi perhatian utama yaitu kemungkinan kandungan Bahan Berbahaya dan Beracun (B3). Material utama penyusun agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi berupa semen, pasir, air, dan konsentrat radioaktif hasil pengolahan limbah radioaktif cair dengan cara evaporasi. Berdasarkan bahan penyusunnya tidak menunjukkan kandungan B3. Limbah radioaktif cair yang diolah dengan proses evaporasi di IPLR-DPFK BRIN pada periode 1989 – 2002 hampir seluruhnya berasal dari Pusat Reaktor Serba Guna (PRSG-BATAN). Limbah radioaktif cair dari PRSG-BATAN tersebut berasal dari fasilitas sistem pemurnian (KBE01, KBE02, FAK01), sistem *hotcell*, dan sistem *venting* tabung berkas [18]. Berdasarkan analisis menggunakan spektrometer γ terhadap limbah mentah dan konsentrat evaporasi, terdapat 3 radionuklida utama dalam limbah/konsentrat tersebut yaitu Co-60, Zn-65, dan Cs-137. Tabel 9 menunjukkan waktu paruh dan nuklida stabil hasil peluruhan radionuklida tersebut.

Tabel 9. Waktu paruh ($t_{1/2}$) dan nuklida stabil hasil peluruhan radionuklida utama yang terdapat dalam limbah radioaktif cair dari PRSG-BATAN

No.	Radionuklida	$t_{1/2}$	Nuklida Stabil
1.	Co-60	5,27 tahun	Ni-60
2.	Zn-65	243,66 hari	Cu-65
3.	Cs-137	30,07 tahun	Ba-137

Berdasarkan Tabel 9 diketahui radionuklida dan nuklida stabil menghasilkan anak luruh bukan merupakan logam berat bersifat B3 [22]. Konsentrasi nuklida stabil hasil peluruhan dalam agregat beton diketahui sangat rendah. Total aktivitas radionuklida dalam setiap shell beton berkisar 0,846 mCi. Jika diasumsikan radionuklida berupa Zn-65 (aktivitas spesifik = 8000 mCi/mg) dan berat agregat beton 1000 kg, maka diperkirakan anak luruh nuklida stabil (Cu-65) memiliki konsentrasi $1,1 \times 10^{-7}$ mg/kg agregat beton. Jika diasumsikan radionuklida berupa Cs-137 (aktivitas spesifik = 88 mCi/mg) dan berat agregat beton 1000 kg, maka diperkirakan anak luruh nuklida stabil (Ba-137) memiliki konsentrasi $9,6 \times 10^{-6}$ mg/kg agregat beton. Dengan demikian konsentrasi nuklida stabil dalam agregat beton diperkirakan berkisar antara $1,1 \times 10^{-7}$ sampai $9,6 \times 10^{-6}$ mg/kg agregat beton. Nuklida stabil hasil peluruhan radionuklida tersebut juga terikat kuat menyatu dalam agregat beton hasil proses sementasi konsentrat evaporasi dan dikungkung dalam tangki logam dan struktur beton dari *shell* beton 950 L. Karena radionuklida dan anak luruh nuklida stabil tidak termasuk kategori B3 [22], kadarnya sangat rendah dan terikat kuat dalam campuran homogen agregat beton, maka potensi bahaya non radiasi berupa keberadaan B3 dalam paket hasil pengolahan limbah radioaktif *shell* beton 950 L sangat rendah dan dapat diabaikan.

Pada waktu mendatang, setelah mendapat persetujuan klierens dari BAPETEN, direncanakan 14 unit *shell* beton 950 L dengan radioaktivitas yang telah mencapai tingkat klierens akan dibuang dan dimanfaatkan sebagai tambahan struktur penyangga pada tanah miring di lokasi Kawasan Nuklir Serpong. Hal ini sangat memungkinkan mengingat *shell-shell* beton 950 L maupun agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi tersebut tidak mengandung bahan-bahan berbahaya dan beracun yang dapat membahayakan masyarakat dan lingkungan. Berdasarkan sudut pandang keselamatan radiasi pengion, karena konsentrasi aktivitas radionuklida dalam *shell* beton/agregat beton telah berada di bawah tingkat klierens dan karakteristik radioaktivitas lainnya yang telah memenuhi kriteria keselamatan, maka dosis radiasi yang berpotensi dapat diterima oleh masyarakat sekitar tidak akan melebihi 10 μ Sv (mikrosievert) per tahun [5], [6].

Pemanfaatan *shell-shell* beton yang dibuang melalui mekanisme klierens sebagai tambahan struktur penahan longsor tanah akibat air hujan pada tebing/tanah miring di lokasi Kawasan Nuklir Serpong sangat dimungkinkan karena struktur *shell* beton 950 L kokoh dan kuat, dengan berat 1 (satu) unit *shell* beton 950 L sekitar 2 ton (2000 kg), berbentuk silinder dengan permukaan datar pada bagian atas dan bawah silinder. Penempatan *shell* beton klierens pada dasar tebing/tanah miring yang telah diratakan disusun secara vertikal (permukaan datar di bagian bawah dan atas) serta berjejer mendatar sebanyak 14 unit diperkirakan akan cukup mampu menahan longsor tanah miring akibat aliran air hujan. Untuk menambah daya penahanan longsor tanah, tanah pada bagian dasar tebing/tanah miring yang diisi dengan 14 unit *shell* beton 950 L, dapat digali sedalam 10 – 20 cm agar *shell-shell* beton tersebut tidak bergeser saat menahan longsor tanah akibat air hujan.

Kekhawatiran terkait kemungkinan zat radioaktif terlindi dari agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi ke lingkungan dapat diminimalisir dengan fakta sebagai berikut.

- Konsentrasi aktivitas radionuklida menjadi sangat rendah akibat proses peluruhan dan teknis pengolahan limbah radioaktif yang dilakukan. Pada saat ini radioaktivitas radionuklida di dalam agregat beton telah berada di bawah tingkat klierens sehingga tidak menimbulkan potensi bahaya radiasi yang mengkhawatirkan.

- Radionuklida yang masih ada dan nuklida stabil hasil peluruhan, terikat kuat dalam padatan agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi. Hasil kondisioning limbah radioaktif cair berupa agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi memiliki karakteristik yang memenuhi standar persyaratan keselamatan [10].
- Agregat beton yang mengikat sisa radionuklida, padat menyatu, dan berada di dalam *shell* beton 950 L sehingga membentuk struktur yang kuat dan kokoh. Struktur *shell* beton 950 L sendiri tersusun dari silinder baja tempat menampung agregat beton dan beton bertulang besi dengan kualitas beton setara K-500. Tebal dinding beton sekitar 14 cm [12]. Bahan struktur *shell* beton 950 L berkualitas baik mampu menahan radionuklida tersisa dalam agregat beton lepas ke lingkungan

KESIMPULAN

Berdasarkan data-data teknis yang telah didapatkan dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa aktivitas radionuklida dari 14 unit *shell* beton 950 L yang di dalamnya berisi agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi periode tahun 1989-2002, telah mencapai tingkat klierens, sehingga memungkinkan untuk diajukan persetujuan klierens ke BAPETEN agar dapat dibuang melalui mekanisme klierens zat/limbah radioaktif. Pemanfaatan 14 unit *shell* beton yang akan dibuang melalui mekanisme klierens sebagai struktur penyangga longsor tanah akibat air hujan pada tanah miring di Kawasan Nuklir Serpong, memungkinkan untuk dilaksanakan. Hal tersebut didukung fakta bahwa *shell* beton 950 L memiliki struktur kokoh dan kuat. *Shell* beton 950 L dan agregat beton hasil sementasi konsentrat evaporasi tidak mengandung Bahan Berbahaya dan Beracun (B3). Perkiraan dosis radiasi yang berpotensi diterima oleh masyarakat sekitar akibat pembuangan *shell-shell* beton tersebut tidak melebihi 10 μ Sv (mikrosievert) per tahun. Berdasarkan data-data penelitian ini, IPLR-DPFK BRIN dapat mengajukan persetujuan klierens ke BAPETEN terhadap 14 unit *shell* beton 950 L tersebut.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada IPLR-DPFK BRIN yang telah memfasilitasi penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Menteri Keuangan Republik Indonesia, *Peraturan Menteri Keuangan Republik Indonesia Nomor 210/PMK.02/2021 Tentang Jenis dan Tarif Atas Jenis Penerimaan Negara Bukan Pajak Kebutuhan Mendesak Yang Berlaku Pada Badan Riset Inovasi dan Nasional*. Jakarta, 2021.
- [2] Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, "Kajian Keselamatan Pembangunan Fasilitas Transit Shelter Untuk Penyimpanan Sementara Limbah Radioaktif Tanah Terkontaminasi Cs-137." Nomor Dokumen K.001/KN 00 01/TLR 5, Edisi/Revisi : 1.3, Jakarta, 2021.
- [3] International Atomic Energy Agency, *Safety Standards Series No. RS-G-1.7 Application of the Concepts of Exclusion, Exemption, and Clearance*. Viena, 2004.
- [4] M. C. C. Hikmat, M. H. Thayib, Dadong Iskandar, "Klierens limbah radioaktif ditinjau dari aspek ekonomi," vol. Vol. 15, no. 4. Buletin Limbah, pp. 1–11, 2018.
- [5] Badan Pengawas Tenaga Nuklir Republik Indonesia, *Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 16 Tahun 2012 Tentang Tingkat Klierens*. Jakarta, 2012, pp. 1–12.
- [6] International Atomic Energy Agency, "Radiation Protection and Safety of Radiation Source: International Basic Safety Standards, General Safety Requirements Part 3." No. GSR Part 3, Vienna, 2014.
- [7] M. Novak, J. Pritsky, V. Daniska, and P. Juhar, "Conditional clearance of radioactive demolition waste in motorway scenario," *Prog. Nucl. Sci. Technol.*, vol. 4, pp. 854–857, 2014, doi: 10.15669/pnst.4.854.
- [8] M. Romli dan Suhartono, "Perhitungan Konsentrasi Aktivitas Paket Limbah Konsentrat Untuk Tujuan Klierens," in *Prosiding Hasil Penelitian dan Kegiatan PTLR Tahun 2016, 2017*, pp. 15–161.
- [9] K. Yokoyama and Y. Ohashi, "Clearance measurement for concrete waste generated by the decommissioning of uranium processing facilities," *ELSEVIER Ann. Nucl. Energy* 175, vol. 175, no. 109240, pp. 1–7, 2022.
- [10] BATAN-Technicatome, "Solid Semi Liquide Waste Treatment: CEMENTATION System Note." PTLR-BATAN, Jakarta, 1986.

- [11] Aisyah, "Karakteristik Hasil Kondisioning Limbah Radioaktif untuk Keselamatan Penyimpanan," in *Prosiding Seminar Nasional Kimia Unesa 2012*, 2012, p. D-1 – D-13.
- [12] Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR), "Spesifikasi Teknis Shell Beton 950 L." PTLR-BATAN, Jakarta, 1988.
- [13] Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, "SOP Pemantauan Laju Dosis, T.001-A.001-M.001/KN 02 01/TLR 5 1 Edisi 01 Revisi 00." Jakarta, 2019.
- [14] Pusat Teknologi Limbah Radioaktif, "SOP Pemantauan Kontaminasi Permukaan, T.004-A.001-M.001/KN 02 01/TLR 5 1 Edisi 01 Revisi 00." Jakarta, 2019.
- [15] International Atomic Energy Agency, "Safety Reports Series No.67: Monitoring for Compliance with Exemption and Clearance Levels." Viena, 2012.
- [16] Badan Tenaga Nuklir Nasional, "SB 014 – BATAN: 2013 Pedoman Tentang Analisis Sampel Radioaktivitas Lingkungan." Jakarta, 2013.
- [17] Pemerintah Republik Indonesia, *Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 58 Tahun 2015 Tentang Keselamatan Radiasi dan Keamanan Dalam Pengangkutan Zat Radioaktif*. Jakarta, 2015.
- [18] K. N, "Pengelolaan Limbah Radioaktif dan B3 di Pusat Reaktor Serba Guna." Bahan Kuliah : Rapat Koordinasi Pengelolaan Limbah Radioaktif, Limbah Bahan Nuklir, dan Limbah B3, 8 – 9 April 2019, Bandung, 2019.
- [19] K. Yokoyama and Y. Ohashi, "Development of clearance verification equipment for uranium-bearing waste," *Appl. Radiat. Isot.*, vol. 145, no. November 2018, pp. 19–23, Mar. 2019.
- [20] K. Yokoyama and Y. Ohashi, "Clearance measurement for general steel waste," *ELSEVIER Ann. Nucl. Energy*, vol. 141, pp. 107299_1-107299_5, 2020.
- [21] Presiden Republik Indonesia, *Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 10 Tahun 1997 Tentang Ketenaganukliran*, no. 1. Jakarta, 1997.
- [22] Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan, *Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Dan Kehutanan Republik Indonesia Nomor 6 Tahun 2021 Tentang Tata Cara dan Persyaratan Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya Dan Beracun*, no. April. Jakarta, 2021, pp. 5–24.