



KL-012

RANCANGAN KONSEPTUAL KONTAINER PENGANGKUTAN UNTUK LIMBAH RADIOAKTIF KAPSUL *FISSION PRODUCT* *MOLYBDENUM*

CONCEPTUAL DESIGN OF TRANSPORTATION CONTAINER FOR RADIOACTIVE WASTE FISSION PRODUCT MOLYBDENUM CAPSULE

M. Romli, D. Pangestu, dan Suhartono

ABSTRAK

Merupakan suatu keniscayaan bahwa kegiatan beroperasinya teknologi nuklir akan menimbulkan limbah radioaktif yang memiliki rentang radioaktivitas rendah hingga tinggi. Salah satu pemanfaatan teknologi nuklir yang menghasilkan limbah dengan radioaktivitas cukup tinggi adalah produksi radioisotop, khususnya produksi *Molybdenum* dengan proses fisi di reaktor yang dilakukan oleh PT INUKI. Dari kegiatan tersebut, salah satunya dihasilkan limbah kapsul *stainless steel* dengan laju dosis yang cukup tinggi sekitar 1 Sv/jam. Agar proses produksi radioisotop dapat tetap berjalan dan menjamin keselamatan pengoperasian fasilitas di PT INUKI maka limbah tersebut harus dikelola dengan mengirimnya ke fasilitas pengelolaan limbah radioaktif milik Pusat Riset dan Teknologi Limbah Radioaktif (PRTLRL). Untuk menjamin keselamatan dalam pengangkutan limbah tersebut ke fasilitas PRTLRL maka diperlukan kontainer pengangkutan yang memadai untuk mengukung radiasi dan kemudahan penanganan limbah tersebut. Kontainer pengangkutan ini merupakan sub sistem dari fasilitas Penyimpanan Sementara Limbah Aktivitas Tinggi (PSLAT) milik PRTLRL. Kontainer pengangkutan didesain menggunakan perangkat lunak *MicroShield* dengan input data berasal dari survei yang telah dilakukan terhadap limbah kapsul *stainless steel* yang berada di dalam *hotcell* PT INUKI. Dalam pemodelan tersebut, digunakan beberapa pilihan material *shielding* untuk mencapai optimalisasi dari segi biaya dan teknis di lapangan. Dibandingkan dengan menggunakan material kombinasi *stainless steel* – beton – *stainless steel* yang membutuhkan ketebalan yang lebih besar, dipilihlah kombinasi material besi – timbal – besi yang lebih optimal dengan ketebalan yang lebih kecil, yaitu masing-masing 0,4 cm - 10 cm - 0,5 cm. Dengan pilihan material dan ketebalan tersebut, dari hasil pemodelan telah memenuhi persyaratan laju dosis untuk pengangkutan, yaitu maksimal 2 mSv/jam.

Kata Kunci: Limbah Kapsul; Kontainer Pengangkutan; *Microshield*; Laju Dosis.

ABSTRACT

It is a necessity that the operation of nuclear technology will generate radioactive waste that has a low to high radioactivity range. One of the uses of nuclear technology that produces waste with high

M. Romli, D. Pangestu, & Suhartono

*Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran BRIN, e-mail: moch032@brin.go.id, moch.romli@brin.go.id

@ 2023 Penerbit BRIN

M. Romli, D. Pangestu, dan Suhartono, "Rancangan konseptual kontainer pengangkutan untuk limbah radioaktif kapsul fission product molybdenum," Dalam *Prosiding Seminar APISORA 2021 "Peran Isotop dan Radiasi untuk Indonesia yang Berdaya Saing,"* T. Wahyono, A. Citraresmini, D. P. Rahayu, Oktaviani, dan N. Robifahmi, Eds. Jakarta: Penerbit BRIN, November 2023, ch. 26, pp. 263–271, DOI: 10.55981/brin.690.c667, E-ISBN: 978-623-8372-02-7



radioactivity is the production of radioisotopes, especially the production of Molybdenum by fission in the reactor carried out by PT INUKI. From these activities, one of them produced stainless steel capsule waste with a fairly high dose rate of about 1 Sv/hour. In order for the radioisotope production process to continue and ensure the safe operation of the facility at PT INUKI, the waste must be managed by sending it to a radioactive waste management facility belonging to the Center for Radioactive Waste Research and Technology (PRTLRL). To ensure safety in transporting the waste to the PRTLRL facility, adequate transport containers are needed to contain radiation and facilitate the handling of the waste. This transport container is a sub-system of the PRTLRL's Temporary Storage for High Activity Waste (PSLAT) facility. The transportation container is designed using Microshield software with input data derived from a survey that has been carried out on stainless steel capsule waste that is in the hotcell of PT INUKI. In the modeling, several choices of shielding materials are used to achieve cost and technical optimization in the field. Compared to using a combination of stainless steel – concrete – stainless steel which requires a larger thickness, a more optimal combination of iron – lead-iron material with a smaller thickness is chosen, each 0.4cm – 10cm – 0.5cm. With the choice of material and thickness, the modeling results have met the requirements for the dose rate for transportation, which is a maximum of 2 mSv/hour.

Keywords: Capsule Waste; Transportation Container; Microshield; Dose Rate.

PENDAHULUAN

Radioisotop dalam bentuk radiofarmaka banyak dimanfaatkan di bidang kesehatan, baik untuk tujuan diagnosis maupun terapi. Pada kebutuhan diagnosis, umumnya radionuklida yang digunakan merupakan pemancar radiasi gamma karena jenis radiasi ini dalam dosis tertentu tidak bersifat merusak, tetapi memiliki daya tembus yang besar sehingga memudahkan untuk mendeteksinya dari luar tubuh menggunakan kamera gamma [1]. Sekitar 80% prosedur diagnostik di kedokteran nuklir menggunakan radioisotop Technetium-99m (^{99m}Tc). Technetium-99m (^{99m}Tc) merupakan radionuklida turunan dari Molybdenum-99 (^{99}Mo) yang dihasilkan dari proses pembelahan inti Uranium-235 (^{235}U) di dalam reaktor nuklir. Proses produksi ^{99}Mo ini menghasilkan limbah radioaktif dalam bentuk padat dan cair [2].

Di Indonesia, PT INUKI telah mulai memproduksi ^{99}Mo sejak tahun 1983, tetapi hampir seluruh limbah radioaktif yang dihasilkan dari proses produksi tersebut tidak segera dikirimkan ke fasilitas pengelolaan limbah radioaktif yang ada di Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN) sehingga hanya menumpuk di dalam *hotcell*. Selain untuk PT INUKI sendiri, permasalahan limbah radioaktif tersebut juga menjadi tantangan tersendiri bagi ORTN karena fasilitas pengelolaan limbah radioaktif di ORTN harus menyiapkan sarana dan prasarana untuk mengelola limbah radioaktif yang memiliki aktivitas dan toksisitas yang relatif tinggi. Oleh karena itu, ORTN melakukan revitalisasi terhadap fasilitas Penyimpanan Sementara Limbah Aktivitas Tinggi (PSLAT) sebagai persiapan pengelolaan terhadap limbah PT INUKI yang memiliki radioaktivitas tinggi [3].

Dalam rangka meningkatkan kemampuan fasilitas PSLAT (Gambar 1), dibutuhkan sub-sistem kontainer pengangkutan untuk mengirimkan limbah



aktivitas tinggi jenis tertentu dari fasilitas penghasil limbah. Target dari rancang bangun kontainer pengangkutan yang dilakukan adalah untuk jenis limbah kapsul teriradiasi yang berasal dari proses produksi radioisotop ^{99}Mo di PT INUKI. Dengan tersedianya kontainer pengangkutan yang memadai, diharapkan dapat meningkatkan keselamatan dan keamanan dalam pengelolaan limbah radioaktif dari kegiatan proses produksi ^{99}Mo . Dengan begitu, secara langsung kegiatan rancang bangun ini dapat menghidupkan dan mendukung peningkatan produksi radioisotop dan radiofarmaka (khususnya ^{99}Mo) buatan dalam negeri.

Salah satu jenis limbah radioaktif yang dihasilkan dari kegiatan proses produksi radioisotop Molybdenum-99 (^{99}Mo) adalah kapsul teriradiasi dari bahan *stainless steel* yang sering disebut sebagai kapsul *fission product molybdenum (FPM)*. Kapsul *FPM* ini memiliki tingkat radiasi yang sangat tinggi, dan dapat mencapai orde *Sievert/jam (Sv/jam)*. Jika ingin melakukan pengangkutan non-eksklusif maka tingkat radiasi maksimum di permukaan luar kontainer pengangkutan harus kurang dari atau sama dengan 2 mSv/jam (Kategori III-kuning) [4].



Gambar 1. Fasilitas PSLAT

Oleh karena itu, dirancang kontainer pengangkutan yang mampu menahan paparan radiasi limbah kapsul *FPM* hingga di bawah 2 mSv/jam . Selain sebagai



pemenuhan terhadap regulasi, ini juga sebagai upaya pembatasan dosis radiasi yang berpotensi diterima oleh petugas selama melakukan pengangkutan. Dosis radiasi dapat memberikan efek stokastik dan non-stokastik. Di mana efek stokastik ini dapat terjadi secara probabilitas dan tidak memerlukan dosis ambang. Sementara itu, efek non-stokastik erat kaitannya dengan dosis ambang jika dosis radiasi yang diterima di bawah dosis ambang maka tidak ada efek samping yang terjadi [5]. Oleh karena itu, dengan kontainer pengangkutan yang memadai dalam menahan radiasi, dapat mengurangi probabilitas terjadinya efek stokastik dan sekaligus mencegah terjadinya efek non-stokastik.

METODE PERCOBAAN

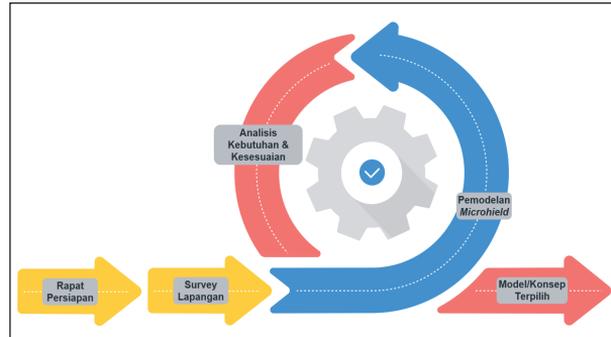
Bahan dan Alat

Kegiatan perancangan ini menggunakan perangkat lunak *MicroShield 7.02*. *MicroShield* merupakan produk dari *Grove Software, Inc.* yang versi pertamanya mulai dibangun tahun 1990. Perangkat lunak ini digunakan untuk melakukan pemodelan dan perhitungan perisai radiasi (*shielding*) secara deterministik yang terbatas pada bentuk geometri tertentu [6].

Pemodelan penahan radiasi dengan menggunakan *MicroShield* sangat mudah dan cepat dilakukan, tetapi perangkat lunak ini tidak dapat memberikan hasil yang presisi untuk bentuk geometri yang kompleks dan material *shielding* yang terdiri lebih dari 1 (satu) jenis material. Meskipun demikian, pemodelan dengan menggunakan *MicroShield* sudah sangat memadai untuk tujuan optimasi prinsip *ALARA (As Low As Reasonably Achievable)* [7].

Tata Kerja

Proses rancang bangun ini digambarkan melalui *agile modeling* (Gambar 2), yaitu suatu proses yang berdasarkan praktik untuk memodelkan dan mendokumentasikan suatu sistem/sub sistem secara efektif. Di dalam *agile modeling*, ditentukan tujuan sebelum membuat model. Di samping itu, dibuat beberapa model di mana tiap model mewakili aspek yang berbeda dari model lain. *Agile modeling* memiliki 3 (tiga) tujuan, yaitu untuk menentukan dan menunjukkan bagaimana melakukan kombinasi antara prinsip dan praktik untuk pemodelan yang efektif dan mudah, mengatasi permasalahan pemodelan dengan pendekatan yang mudah, serta untuk meningkatkan aktivitas pemodelan yang juga mendukung untuk pengembangan perangkat lunak yang digunakan [8].



Gambar 2. Agile Modeling pada Rancang Bangun Kontainer Pengangkutan

Kegiatan rancang bangun dimulai dengan rapat persiapan survei yang sekaligus menjadi media diskusi dengan pemilik limbah radioaktif, yaitu PT INUKI pada tanggal 10 Februari 2020. Kemudian, dilakukan survei lapangan limbah radioaktif milik PT INUKI, khususnya kapsul SS/ FPM, pada tanggal 18 Februari 2020. Dari hasil survei lapangan ini dilakukan pemodelan *transport container* untuk beberapa desain dengan menggunakan perangkat lunak *MicroShield 7.02*. Dari desain-desain yang telah dimodelkan, kemudian dianalisis untuk melihat desain kontainer pengangkutan mana yang memiliki kemampuan penahan radiasi yang optimal dan yang paling mudah angkat angkutnya, baik pada saat proses *loading* di fasilitas PT INUKI maupun pada saat *unloading* di Fasilitas PSLAT milik PRTLRL.

Dari hasil survei lapangan yang dilakukan pada tanggal 18 Februari 2020 didapatkan tingkat radiasi dari sampel 3 (tiga) buah kapsul SS/FPM, sebagai berikut.

Tabel 1. Hasil Pengukuran Tingkat radiasi Sampel Kapsul FPM

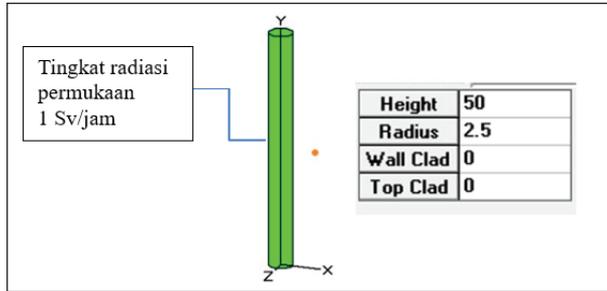
No.	Jenis Kapsul	Laju Dosis (mSv/jam) pada jarak	
		Kontak	100 cm
1.	Kapsul SS	893	3.67
2.	Kapsul SS	890	3.96
3.	Kapsul SS	153	1.78

Dengan tingkat radiasi kapsul FPM yang tinggi (orde ratusan *mSv/jam* hingga *Sv/jam*), untuk mengirimkan limbah radioaktif tersebut ke Fasilitas PSLAT milik PRTLRL harus digunakan kontainer pengangkutan yang mampu menahan radiasi hingga lebih kecil atau sama dengan 2 *mSv/jam*.

Langkah pertama pemodelan kontainer pengangkutan dilakukan dengan memperkirakan aktivitas tiap kapsul. Dari hasil survei lapangan dan histori/dokumentasi produksi ⁹⁹Mo maka dilakukan perhitungan perkiraan aktivitas kapsul FPM dengan ⁶⁰Co sebagai radionuklida pemancar gamma dominan yang terdeteksi. Dengan asumsi tingkat radiasi pada permukaan kapsul FPM adalah 1 *Sv/jam* maka didapatkan



perkiraan aktivitas tiap kapsul adalah 2 Ci. Perhitungan perkiraan aktivitas kapsul ini menggunakan perangkat lunak *MicroShield 7.02* dengan melakukan *trial & error* hitung balik hingga mendapatkan paparan radiasi permukaan mendekati 1 Sv/jam untuk bahan dan dimensi kapsul yang telah diketahui.



Gambar 3. Dimensi dan Tingkat Radiasi Kapsul *FPM*

Kapsul *FPM* merupakan kapsul berbentuk silinder dengan dimensi tinggi 50 cm dan jari-jari 5 cm. Dengan berbekal estimasi aktivitas dan dimensi kapsul *FPM* maka dapat dilakukan pemodelan kontainer pengangkutan dan menggunakan perangkat lunak *Microshield 7.02*.

Desain dari kontainer yang juga berperan sebagai perisai radiasi (*shielding*) akan dibuat dengan memperhatikan radionuklida dan jenis radiasinya. Di mana kontainer menjadi penghalang yang dapat menyerap energi pancaran/paparan radiasi sehingga diharapkan sebagian besar energi yang datang dapat diserap oleh kontainer tersebut. Secara matematis, intensitas radiasi awal (I_0) yang melewati perisai radiasi tersebut akan menjadi intensitas radiasi akhir (I) menurut persamaan:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

di mana μ adalah koefisien atenuasi linier dari material sebagai perisai radiasi untuk radiasi gamma dan sinar X dalam satuan cm^{-1} dan x adalah tebal dari bahan perisai radiasi yang digunakan [9].

Persamaan tersebut adalah bentuk sederhana dari pemodelan perisai radiasi. Pemodelan dengan menggunakan *MicroShield* menggunakan perhitungan yang lebih komprehensif dengan memperhatikan geometri sumber radioaktif dan perisai radiasi, material tunggal atau kombinasi untuk perisai radiasi, aktivitas dari 1 (satu) atau lebih jenis radionuklida, anak luruh radionuklida, jarak pajanan, dan juga *build up factor*.

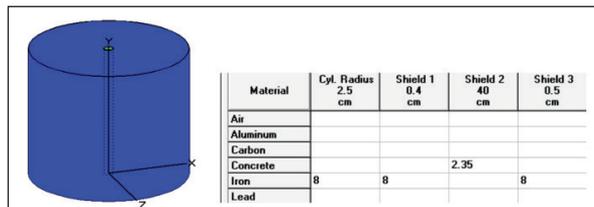
Dalam memilih jenis material perisai radiasi, perlu dipertimbangkan ketersediaan, efektivitas, pertimbangan ekonomi, dan kendala dalam mengaplikasikannya [10]. Dalam desain yang akan dibuat digunakan 2 (dua) jenis material yang relatif murah dan mudah didapatkan. Yang pertama adalah timbal (*Pb*), di mana material ini paling sering digunakan sebagai perisai radiasi karena memiliki nomor atom yang



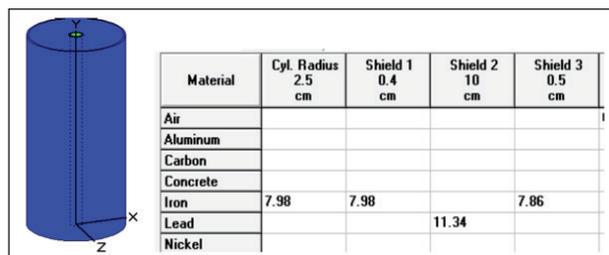
tinggi, densitas tinggi, biaya yang relatif murah, dan tentunya efektif dalam menahan radiasi gamma. Material kedua yang digunakan dalam desain ini adalah beton, di mana beton merupakan material yang efektif dan ekonomis untuk dijadikan perisai radiasi seperti yang diaplikasikan pada bangunan reaktor nuklir, akselerator, dan juga laboratorium penelitian yang menggunakan radioaktif dengan aktivitas relatif tinggi. Ini dikarenakan kuat tekan dan durabilitas material beton yang lama [11].

Dengan menggunakan perangkat lunak *MicroShield 7.02*, Dilakukan pemodelan dengan 2 (dua) jenis alternatif material di atas sebagai perisai radiasi.

- 1) Desain kontainer 1 (Gambar 4): bentuk silinder terbuat dari material SS – beton – SS dengan tebal masing-masing 0,4 cm : 40 cm : 0,5 cm.
- 2) Desain kontainer 2 (Gambar 5): bentuk silinder terbuat dari material besi – timbal – besi dengan tebal masing-masing 0,4 cm : 10 cm : 0,5 cm.



Gambar 4. Desain Kontainer 1



Gambar 5. Desain Kontainer 2

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dengan pemodelan *Microshield 7.02* untuk perhitungan perisai radiasi kapsul *FPM*, nilai tingkat radiasi pada permukaan kapsul dengan pemodelan *cylinder surface* untuk desain kontainer pertama adalah 1,33 mSv/jam dan untuk desain kontainer kedua adalah 0,53 mSv/jam. Dengan demikian, desain kontainer pengangkutan yang digunakan adalah desain kontainer kedua.

Untuk mengoptimalkan performa tebal perisai radiasi (timbal/ *Pb*) terhadap penurunan tingkat radiasi maka dilakukan variasi tebal *Pb* yang digunakan sebagai berikut.

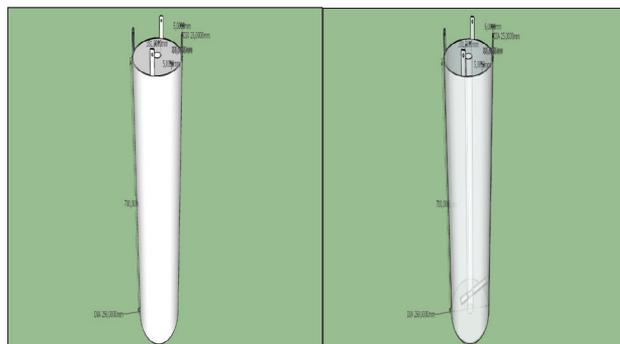


Tabel 2. Variasi Tebal *Pb* dengan Tingkat Radiasi

Tebal Pb (cm)	Paparan Kontak (mSv/jam)
8	2.22
9	1.08
10	0.53

Dari hasil tersebut, dapat diputuskan bahwa desain yang akan digunakan adalah desain kontainer kedua dengan perisai radiasi berupa *Pb* dengan tebal minimal 9 cm. Selain kemampuan menahan radiasi yang lebih baik, dengan ketebalan yang lebih kecil akan memudahkan dalam angkat angkut meskipun tetap membutuhkan alat bantu. Dengan ketersediaan bahan *Pb* yang dimiliki oleh PRTLRL sehingga biaya pembuatan kontainer pengangkutan dengan desain kontainer kedua diperkirakan tidak akan berbeda jauh dengan desain kontainer pertama yang berbahan beton.

Setelah mendapatkan jenis material dan ketebalan perisai radiasi yang memadai, berikutnya dilakukan desain purwarupa dari kontainer yang akan dibuat dengan meninjau kemudahan angkat dan juga *loading-unloading*. Kontainer berbentuk tabung yang telah didesain menggunakan *MicroShield* kemudian ditambahkan bagian yang akan digunakan untuk memudahkan dalam penggunaannya nanti untuk pengangkutan limbah kapsul *FPM*.



Gambar 6. Desain Purwarupa Kontainer Pengangkutan Kapsul *FPM*

KESIMPULAN

Untuk mengangkut limbah radioaktif kapsul *FPM* dari fasilitas PT INUKI ke Fasilitas PSLAT milik PRTLRL, diperlukan kontainer pengangkut yang memenuhi persyaratan yang ada di dalam Peraturan Pemerintah Nomor 58 Tahun 2015 tentang Keselamatan Radiasi dan Keamanan dalam Pengangkutan Zat Radioaktif. Dari kegiatan rancang bangun konseptual yang dilakukan, didapatkan bahwa desain kontainer pengangkutan yang digunakan adalah kontainer pengangkutan yang menggunakan material *Pb* dengan tebal minimal 9 cm.



UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diberikan kepada manajemen ORTN pada umumnya, dan khususnya kepada rekan-rekan dalam Tim Pengembangan Teknologi Pengelolaan Limbah Radioaktif Aktivitas Tinggi yang telah membantu dalam kegiatan rancang bangun ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. E. Sriyani, S. I. S. I. S, and A. H. Ws, "Optimalisasi penandaan 99mTc-Dtpa-Ketokonazol sebagai radiofarmaka untuk deteksi infeksi fungi," *Jurnal Sains Dan Teknologi Nuklir Indonesia*, vol. 14, no. 1, Nov. 2013, doi: 10.17146/jstni.2013.14.1.681.
- [2] S. K. Lee dkk., "Development of fission 99Mo production process using HANARO," *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 52, no. 7, pp. 1517–1523, 2020, doi: 10.1016/j.net.2019.12.019.
- [3] D. S. Wisnubroto dkk., "Challenges of implementing the policy and strategy for management of radioactive waste and nuclear spent fuel in Indonesia," *Nucl. Eng. Technol.*, vol. 53, no. 2, pp. 549–561, 2021, doi: 10.1016/j.net.2020.07.005.
- [4] Organismo Internacional de Energía Atómica, "SSR-6 (Rev.1) - Regulations for the Safe Transport of Radioactive Material," *IAEA Saf. Stand. Prot. people Environ.*, vol. 6, 2018.
- [5] F. Suharyanto, R. Oemiati, dan T. A. Jovina, "Level of radiation exposure in several hospitals in Indonesia," *Heal. Sci. J. Indones.*, vol. 3, pp. 15–18, Jun. 2012, doi: 10.22435/hsji.v3i1Jun.420.15-18.
- [6] M. Adams and S. Smalian, "Shielding calculations on waste packages - the limits and possibilities of different calculation methods by the example of homogeneous and inhomogeneous waste packages," *EPJ Web Conf.*, vol. 153, pp. 2016–2018, Jan. 2017, doi: 10.1051/epjconf/201715305023.
- [7] M. M. Lištjak dkk., "Buildup factors for Multilayer shieldings in deterministic methods and their comparison with monte carlo," pp. 2–5.
- [8] S. Ambler, *Agile Modeling: Effective Practices for eXtreme Programming and the Unified Process*. 2002.
- [9] Irsyad, S. Purnomo, dan R. H. Oetami, "Design of reflector TRIGA mark II Bandung waste container shielding using micro shield 7.02.," *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1436, p. 012076, 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1436/1/012076.
- [10] V. Kumar dkk., "Investigations on some low-Z alkali minerals as gamma-ray shields," *Int. J. Latest Res. Sci. Technol.*, vol. 1, no. 4, pp. 324–333, 2012.
- [11] R. Mirji and B. Lobo, "24. Radiation shielding materials: A brief review on methods, scope and significance," *P.C. Jabin Sci. Coll.*, no. June, p. 27, 2017.