



REUSE DAN RECYCLE LIMBAH RADIOAKTIF COBALT-60: KAJIAN DALAM MATA KULIAH FISIKA LINGKUNGAN DI FKIP UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Jennyfer Ocha Canticha^{1*}, Murniati²

^{1,2}Pendidikan Fisika, FKIP Universitas Sriwijaya, Indonesia

*Email: jennyferocha2002@gmail.com

Abstract

Waste is a problem that requires immediate handling. The use of chemical elements in life also produces waste. One element that has been widely used is cobalt. Cobalt is a silver-gray metal that is hard and shiny. The type of Cobalt that is often used is Cobalt-60 which is the result of neutron irradiation of the stable isotope Cobalt-59. Cobalt-60 has been widely used, for example in radiotherapy. However, this utilization also produces Cobalt-60 waste in solid form. This research aims to investigate what efforts can be made to treat Cobalt-60 waste resulting from radiotherapy. This research uses a literature study method from trusted reference sources. After conducting a literature review and observations from various sources, the results were obtained that Cobalt-60 waste in Indonesia can be reused for purposes in other fields. This has already been done, namely reusing Cobalt-60 resulting from radiotherapy for practical facilities and calibration facilities.

Keywords: *Reuse, Recycle, Cobalt-60, Radioactivity, Radiation*

Abstrak

Limbah merupakan salah satu permasalahan yang memerlukan penanganan secepatnya. Pemanfaatan unsur-unsur kimia dalam kehidupan ternyata juga menghasilkan limbah. Salah satu unsur yang sudah banyak dimanfaatkan adalah Cobalt. Cobalt merupakan logam yang berwarna abu-abu perak yang keras dan berkilau. Jenis Cobalt yang sering digunakan adalah Cobalt-60 yang merupakan hasil dari penyinaran neutron terhadap isotop stabil Cobalt-59. Cobalt-60 sudah banyak dimanfaatkan contohnya dalam radioterapi. Namun, pemanfaatan ini juga menghasilkan limbah Cobalt-60 dalam bentuk padatan. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki apa saja upaya yang dapat dilakukan terhadap limbah Cobalt-60 hasil dari radioterapi. Penelitian ini menggunakan metode studi literatur dari sumber referensi terpercaya.

Kata kunci: *Reuse, Recycle, Cobalt-60, Radioaktivitas, Radiasi.*

Cara Menulis Sitasi:

Ocha Canticha, J. Murniati (2024). Reuse Dan Recycle Limbah Radioaktif Cobalt -60: Kajian Dalam Mata Kuliah Fisika Lingkungan Di FKIP Universitas Sriwijaya. *Jurnal Inovasi dan Pembelajaran Fisika*. 11(2), halaman 154-163.

PENDAHULUAN

Radiasi merupakan proses merambatnya suatu energi dari sumber ke lingkungan tanpa memerlukan panas (Swamardika, 2009). Kata radiasi tentunya sudah tidak asing lagi di kalangan masyarakat dan sering dianggap sebagai hal menakutkan yang sangat berbahaya. Padahal radiasi juga memiliki dampak yang positif dan menguntungkan bagi manusia. Dalam radiasi juga dikenal istilah zat radioaktif yang mengandung inti tidak stabil dan mempunyai kemampuan untuk memancarkan radiasi secara spontan (Fayanto et al., 2016).

Salah satu unsur yang menghasilkan radiasi adalah Cobalt. Cobalt sudah dimanfaatkan sebagai bahan perhiasan, tembikar, serta untuk mewarnai kaca sejak zaman Perunggu (Dehaine et al., 2021). Kata Cobalt diambil dari kata kobold (Bahasa Jerman) yang berarti goblin (istilah yang dipakai untuk bijih Cobalt oleh para penambang). Upaya pertama melebur bijih Cobalt yaitu untuk dijadikan tembaga atau perak, namun gagal dan hanya menghasilkan bubuk (Cobalt (II) oksida).

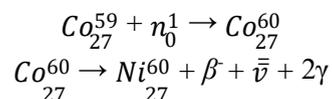
Pada tahun 1735, ahli kimia Swedia George Brandt (1694–1768) berjasa menemukan Cobalt, beliau menunjukkan bahwa ada unsur yang berbeda dari bismut dan logam tradisional lainnya yang kemudian ia sebut dengan semi-metal baru. Beliau menunjukkan logam Cobalt menjadi penyebab warna biru pada kaca. Cobalt menjadi logam pertama yang ditemukan sejak masa prasejarah dan kini diberi lambang Co dengan nomor atom 27.

Cobalt hanya ditemukan sebanyak 0,001% dari kerak bumi dalam bentuk campuran di alam (Renardi, 2018). Atom Cobalt memiliki warna berkilauan dan keabu-abuan serta berifat rapuh agak keras, mengandung metal, dan magnetis (Oktora SR, 2016). Cobalt digunakan dalam pembuatan magnetis, tahan aus, dan berkekuatan tinggi. Cobalt banyak digunakan dalam pelapisan baterai dan pelapisan listrik. Cobalt memiliki banyak jenis, namun hanya Cobalt-59 yang memiliki isotop stabil. Cobalt dan senyawanya dianggap sedikit beracun.



Gambar 1. Bentuk Fisik Cobalt

Produksi radioisotop Cobalt-60 dapat terjadi dengan memberikan penyinaran neutron ke isotop stabil Cobalt-59 dalam reaktor nuklir, sehingga Cobalt-59 akan meluruh dan berada pada keadaan tereksitasi (Bashori et al., 2016). Berikut persamaan reaksinya:



Berdasarkan dengan sifat inti atom, jika inti atom berada dalam keadaan tereksitasi maka inti atom tersebut akan kembali ke keadaan dasarnya dengan melepaskan energi berupa radiasi gamma. Dalam keadaan tidak stabil, Cobalt-60 akan meluruh dengan memancarkan dua kali sinar gamma yang besarnya 1,17 MeV dan 1,33 MeV (Sari et al., 2020) (Trisnawati, 2017).

Cobalt-60 memiliki waktu paruh yang cukup panjang sebesar 5,2710 tahun dan untuk

mengetahui aktivitas radiasinya diperlukan pemeriksaan serta sumber radiasi harus diganti setiap lima tahun sekali (Aziz et al., 2015).

Tabel 1 Kelimpahan Cobalt di Bumi

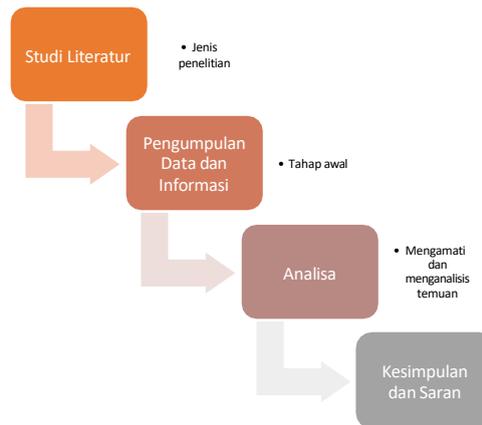
Isotop	Kelimpahan	Waktu Paruh	Mode Peluruhan
Co-56	Sintetis	77,27 hari	ϵ
Co-57	Sintetis	271,74 hari	ϵ
Co-58	Sintetis	70,86 hari	ϵ
Co-59	100%		Stabil
Co-60	Sintetis	5,2714 tahun	β, γ

Cobalt-60 sudah banyak dimanfaatkan dalam berbagai bidang. Contohnya yaitu untuk mengiradiasi bahan pangan baik dalam skala laboratorium maupun skala industri (Irawati, 2008). Pada laman resmi Bapeten dijelaskan bahwa pemanfaatan Cobalt-60 dalam bidang kesehatan yaitu untuk keperluan radioterapi, sedangkan dalam bidang industri sering dimanfaatkan sebagai *logging*, *gauging*, radiografi, bahkan juga untuk *scanning* pada sistem *portal detector*. Namun, dalam pemanfaatannya, zat ini juga dapat menghasilkan limbah yang memiliki potensi bahaya bagi lingkungan. Oleh karena itu, pemerintah mulai mengupayakan pengelolaan limbah zat radioaktif agar dapat dimanfaatkan kembali. Berdasarkan PP Republik Indonesia No.61 Pasal 1 Tahun 2013, Pengelolaan Limbah Radioaktif adalah aktivitas yang melingkupi pengumpulan, pengelompokan, pengolahan, pengangkutan, penyimpanan, dan/atau pembuangan limbah zat radioaktif (Pemerintah & Bapeten, 2013). Limbah zat radioaktif disimpan dan diolah di Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR) agar dapat digunakan kembali (Widodo et al., 2017).

Pengelolaan limbah zat radioaktif tidak sembarangan dilakukan, karena harus sesuai dengan prosedur yang berlaku dan harus mendapatkan penanganan khusus (Fatoni et al., 2017). Di Indonesia, salah satu limbah zat radioaktif yang sudah digunakan kembali adalah limbah Cobalt-60. Dalam makalah ini akan diberikan gambaran mengenai Cobalt-60 mulai dari pengertiannya, manfaat sebelum menjadi limbah, pemanfaatannya setelah digunakan kembali (*reuse*), dan potensi pengolahan kembali (*recycle*) limbah radioaktif.

METODE

Penelitian ini menggunakan metode penelitian studi literatur atau studi kepustakaan. Studi ini bertujuan untuk mengumpulkan informasi berupa kepustakaan tentang topik pembahasan yang diteliti (Ridwan et al., 2021). Sumber referensi dalam penelitian ini yaitu berupa buku, karya tulis ilmiah, artikel jurnal, artikel internet dan tulisan lainnya yang terkait.



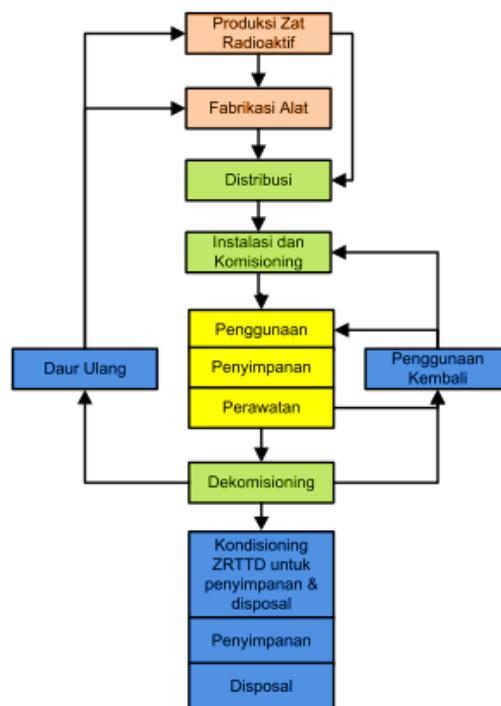
Gambar 2. Diagram Alir Konsep Penelitian

Penelitian ini disebut juga dengan penelitian studi literatur. Studi literatur yaitu beberapa rangkaian kegiatan yang dilakukan dengan cara mengumpulkan data pustaka, membaca informasi terkait lalu mencatatnya, dan mengolah data penelitian yang didapat hingga akhirnya dapat menarik suatu kesimpulan dari hasil penelitian (Pilendia, 2020).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Cobalt-60 sudah banyak dimanfaatkan dalam beberapa bidang. Namun, tak bisa dipungkiri pemanfaatan tersebut juga menghasilkan limbah yang tidak boleh dikelola secara asal-asalan. Limbah zat Cobalt-60 yang ditampung oleh Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR) dapat diolah kembali agar bisa dimanfaatkan kembali.

Menurut Hermawan (2019) Cobalt-60 termasuk salah satu jenis zat radioaktif bentuk khusus berupa padatan yang terbungkus dalam kapsul maupun yang tidak terbungkus dalam kapsul. Setelah menjadi limbah, zat ini akan kembali dimasukkan ke dalam kapsul pembungkus dengan tipe-A. Limbah radioaktif Cobalt-60 akan ditampung di PTLR. Ada 3 cara penyaluran limbah zat radioaktif yaitu dengan mengalihfungsikan zat radioaktif yang sudah tidak efektif ke bidang lain, mengembalikan limbah zat radioaktif ke negara asal (reeksport), dan melakukan *reuse/recycle* limbah radioaktif oleh badan terkait (Romli, 2022).



Gambar 3. Siklus Hidup Zat Radioaktif (Batan, n.d.)

Radioterapi Cobalt-60 mempunyai sumber radiasi berbentuk silinder dengan jari-jari 1 cm. Menurut Kodrat et al., (2016), aktivitas sumber radiasi berkisar antara 5.000 Ci - 15.000 Ci. Sedangkan untuk mesin Cobalt biasanya menggunakan aktivitas sekitar 444 TBq (12.000 Ci). Sumber Cobalt-60 meluruh dengan laju sekitar 1% per bulan. Oleh karena itu, aktivitas rata-rata yang ditemui di mesin ini pada suatu titik waktu berkisar antara 185–333 TBq (5000–9000 Ci).

Setelah penggunaan selama 5-7 tahun, maka sumber radiasi yang memiliki aktivitas radiasi < 3000 Ci harus diganti dengan sumber radiasi yang baru (Kodrat et al., 2016). Oleh karena itu, jika kadar radioaktifnya sudah 3000 Ci maka Cobalt-60 ini tidak dapat digunakan lagi untuk pengobatan radioterapi. Sisa inilah yang kemudian disebut dengan limbah radioterapi. Nah limbah ini dapat

digunakan kembali untuk sektor lain yaitu untuk *logging* minyak dan batubara. Karena pada mesin *logging* minyak umumnya hanya memerlukan tingkat aktivitas sekitar 25 mCi sampai dengan 200 mCi (Widodo et al., 2017).

Reuse Limbah Cobalt

Adapun langkah-langkah yang harus dilakukan untuk *reuse* limbah Cobalt-60 adalah sebagai berikut ((Romli, 2022) :

a. Kajian Awal

Kajian awal dilakukan oleh PTLR/ PTLR yaitu sebagai berikut:

- 1) Pemeriksaan kondisi fisik pembungkus primer.
- 2) Identifikasi jenis radionuklida dan serial number di pembungkus primer.
- 3) Identifikasi jenis radionuklida dengan gamma spectrometer portable.
- 4) Uji kebocoran/ uji usap (kontaminasi permukaan) pembungkus primer.

b. Sertifikasi Uji Kebocoran dan Standarisasi Aktivitas

Hal ini dilakukan di Lab Radiasi Pasar Jumat/ PTKMR dengan tahap sebagai berikut:

- 1) Uji kebocoran.
- 2) Pengukuran laju paparan.
- 3) Standarisasi aktivitas.

c. Monitoring Status (Sekuensial)

- 1) Permohonan anda telah diterima. Permohonan anda di verifikasi paling lambat dalam 3 hari ke depan.
- 2) Permohonan anda telah di verifikasi. Zat radioaktif terbungkus yang anda butuhkan tersedia. Silahkan konfirmasi persetujuan terhadap penawaran harga dan unggah kontrak yang telah ditandatangani.
- 3) Penawaran harga dan kontrak telah anda setujui, silahkan tunggu konfirmasi selanjutnya dalam 20 hari ke depan.
- 4) Zat radioaktif terbungkus yang tersedia laik untuk digunakan kembali. Silahkan ajukan permohonan standarisasi sumber radioaktif dan uji bebas kontaminasi ke Lab Radiasi Pasar Jumat. Kemudian unggah sertifikat hasil uji.
- 5) Sertifikat standarisasi sumber radioaktif dan uji bebas kontaminasi telah diverifikasi. Silahkan ajukan izin pemanfaatan dan persetujuan pengiriman zat radioaktif ke BAPETEN. Kemudian unggah izin pemanfaatan dan persetujuan pengiriman zat radioaktif.

- 6) Izin pemanfaatan dan persetujuan pengiriman zat radioaktif telah diverifikasi. Silahkan melakukan pembayaran tagihan penggunaan kembali zat radioaktif terbungkus dan tentukan tanggal pengangkutan zat radioaktif terbungkus.

Kasus di Indonesia:

Di Indonesia, *reuse* Cobalt-60 baru dilakukan dua kali yaitu : ZRTTD *gauging* di *reuse* menjadi sarana praktikum (pengukuran radiasi, *level gauging* skala lab, dll) yang dilakukan oleh pihak pengaju Atro Bali dan ZRTTD teleterapi di *reuse* menjadi sarana kalibrasi (Romli, 2022).

Pengelolaan Kembali (*Recycle*)

Dalam upaya meminimalisir jumlah limbah zat radioaktif, maka dapat dilakukan suatu pengelolaan kembali limbah radioaktif berupa sumber terbungkus yang sudah tidak dipakai lagi. Namun *recycle* tersebut harus melewati proses pengkajian terlebih dahulu sebelum dapat melakukan proses pengelolaan kembali yang tentunya harus sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Lembaga yang berwenang salah satunya yaitu PTLR. Lembaga ini berkewenangan untuk menyatakan dan menentukan suatu sumber terbungkus bekas dapat digunakan kembali (*reuse*) atau diolah kembali (*recycle*). Tidak semua limbah radioaktif bisa diolah kembali. Zat radioaktif yang dapat diolah kembali (*recycle*) dapat berupa Zat Radioaktif Terbungkus yang Tidak Digunakan (ZRTTD). Namun sebelum diolah kembali, limbah ZRTTD tersebut harus melewati pengkajian agar dapat ditentukan apakah limbah zat radioaktif tersebut dapat diolah kembali atau tidak. Kajian tersebut terdiri dari kajian awal dan kajian keselamatan (Batan, n.d.). Kajian awal setidaknya harus meliputi : kondisi fisik pembungkus, tingkat kontaminasi, dan radioaktivitas. Sedangkan kajian keselamatan terdiri dari : kajian pembungkus, kajian tingkat kebocoran kapsul, dan kajian radioaktivitas.

Selain itu, PTLR tidak akan sembarang melakukan pengelolaan ulang terhadap suatu zat radioaktif. Harus ada pihak pemohon yang mengajukan permohonan untuk proses pengelolaan limbah radioaktif. Permohonan ini dapat diajukan melalui portal eLIRA (Batan, n.d.):

- 1) Pihak pemohon harus memiliki akun eLIRA terlebih dahulu sebelum melakukan permohonan.
- 2) Jika sudah memiliki akun, maka pihak pemohon bisa langsung mengajukan permohonan *reuse/recycle* ZRTTD secara *online* pada laman eLIRA.
- 3) Pihak PTLR akan melakukan verifikasi permohonan yang diajukan oleh pihak pemohon dan PTLR akan mengecek ketersediaan ZRTTD yang dibutuhkan oleh pihak pemohon.
- 4) Jika ZRTTD yang dibutuhkan pihak pemohon tersedia dengan jumlah yang cukup, maka pihak PTLR akan mengirimkan penawaran harga *recycle* dan draf kontrak kerjasama antara pemohon dan PTLR.
- 5) Selanjutnya, pihak pemohon akan mengkonfirmasi persetujuan ataupun ketidaksetujuan mereka terhadap penawaran harga yang ditetapkan oleh pihak PTLR. Jika setuju, maka

selanjutnya pihak pemohon dapat menandatangani kontrak Kerjasama yang selanjutnya akan dikirimkan melalui laman eLIRA.

- 6) Jika penawaran harga dan kontrak kerjasama telah disetujui dan ditandatangani oleh pihak pemohon, maka selanjutnya pihak PTLR akan melakukan pengkajian awal terkait kelayakan ZRTTD yang akan di-*recycle*.
- 7) Dokumen hasil dari kajian tersebut nantinya dapat diunduh oleh pihak pemohon di laman eLIRA agar bisa dimanfaatkan sebagai dokumen pelengkap dalam pengajuan permohonan uji standarisasi aktivitas radiasi dan uji bebas kontaminasi ke PTKMR BATAN.
- 8) Dengan dilengkapi dokumen kajian awal, maka pihak pemohon dapat mengirimkan pengajuan permohonan kepada pihak PTKMR (diluar laman eLIRA) untuk uji standarisasi aktivitas radiasi dan uji bebas kontaminasi terhadap ZRTTD.
- 9) Kemudian pihak PTKMR akan mulai melakukan proses sertifikasi terhadap ZRTTD yang akan di-*recycle* meskipun ZRTTD tersebut masih disimpan di fasilitas PTLR. Sertifikat dari pihak PTKMR ini berisi kelayakan ZRTTD untuk di-*recycle* serta dapat digunakan sebagai syarat dalam permohonan pengajuan pemanfaatan dan persetujuan pengiriman zat radioaktif oleh BAPETEN.
- 10) Setelah melakukan pengajuan ke pihak BAPETEN, maka pihak pemohon diharapkan menunggu hasilnya. Jika BAPETEN menyetujui penajuan pemohon, maka BAPETEN akan menerbitkan izin pemanfaatan dan persetujuan pengiriman zat radioaktif. Selanjutnya, pihak pemohon diharapkan dapat segera membayar sejumlah tagihan untuk proses *recycle* ZRTTD kepada pihak PTLR sesuai dengan kesepakatan yang telah disetujui.
- 11) Terakhir, pihak pemohon bisa melakukan pengangkutan zat radioaktif terbungkus dari lokasi PTLR ke lokasi pemohon.

Adapun langkah-langkah yang dilakukan sebelum *recycle* Cobalt-60 yaitu sebagai berikut (Widodo et al., 2017):

- 1) Melakukan pengkajian keselamatan bungkusan limbah zat radioaktif terbungkus Cobalt-60 yang sudah tidak digunakan yang akan diolah kembali.
- 2) Melakukan pengkajian terhadap proses pengeluaran kapsul luar yang berisi dari kapsul dalam dari pembungkusan luar.
- 3) Melakukan pengkajian terhadap proses pengeluaran kapsul dalam yang berisi zat radioaktif Cobalt-60 dari kapsul luar.
- 4) Melakukan pengkajian terhadap proses pengeluaran granul Cobalt-60 dari kapsul dalam.
- 5) Melakukan pengkajian terhadap proses pemasukan granul zat radioaktif Cobalt-60 ke kapsul dalam yang baru.

- 6) Melakukan pengkajian terhadap proses pengujian awal kapsul dalam baru yang berisi granul Cobalt-60.
- 7) Melakukan pengkajian terhadap proses standarisasi aktivitas radiasi Cobalt-60.
- 8) Melakukan pengkajian terhadap proses pengujian Cobalt-60 hasil *recycle* sebagai zat radioaktif bentuk khusus yang baru.
- 9) Melakukan pengkajian terhadap proses sertifikasi zat radioaktif bentuk khusus untuk produk Cobalt-60 hasil *recycle*.

Hasil akhir dari kajian menunjukkan bahwa BAPETEN tidak akan mengeluarkan sertifikat izin jika persyaratan teknis yang dilakukan oleh PTLR dan PTKMR tidak terpenuhi.

KESIMPULAN

Pemanfaatan Cobalt-60 sudah banyak dilakukan dan berdampak menimbulkan limbah radioaktif. Limbah ini berupa padatan Cobalt-60 yang sudah berkurang kadar aktivitas radioaktifnya. Sehingga tidak dapat digunakan lagi dalam proses radioterapi. Di Indonesia, ada beberapa tindakan yang dapat dilakukan terhadap limbah Cobalt-60 yaitu menggunakan kembali untuk keperluan lain (*reuse*), ditampung di PTLR lalu dikembalikan ke negara asal, dan diolah kembali (*recycle*) guna memanfaatkan dan mengurangi limbah radioaktivitas. Namun, semua upaya tersebut harus mengikuti prosedur yang berlaku demi memastikan keamanan limbah Cobalt-60.

DAFTAR PUSTAKA

- Aziz, M., Hidayanto, E., & Lestari, D. D. (2015). Penentuan Aktivitas Co-60 dan Cs-137 pada Sampel Unknown dengan Menggunakan Metode Detektor HPGe. *Youngster Physics Journal*, 4(2), 189–196.
- Bashori, A., Nurhasanah, I., & Arifin, Z. (2016). Sensitifitas Larutan Nanopartikel Ceo2 Terhadap Radiasi Sinar Gamma Teleterapi Cobalt-60. *Youngster Physics Journal*, 5(4), 141–148.
- Batan. (n.d.). Tentang Reuse/ Recycle Zat Radioaktif Terbungkus. In *Elira Brin* (p. 6). https://elira.brin.go.id/index.php/theme/manual_reuse
- Dehaine, Q., Tijsseling, L. T., Glass, H. J., Törmänen, T., & Butcher, A. R. (2021). Geometallurgy of cobalt ores: A review. *Minerals Engineering*, 160(December 2020). <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106656>
- Fatoni, N., Imanuddin, R., & Darmawan, A. R. (2017). Pendayagunaan Sampah Menjadi Produk Kerajinan. *Dimas: Jurnal Pemikiran Agama Untuk Pemberdayaan*, 17(1), 83. <https://doi.org/10.21580/dms.2017.171.1505>
- Fayanto, S., Yanti, Pati, S., Suwardi, E., Afiudin, A., Hartin Uleo, H., & Ayu Ningsih, S. (2016). Peluruhan Zat Radioaktif. *Jurnal Praktikum Fisika Modern*, 1–18.
- Hermawan, N. T. E. (2019). *Kebijakan Nasional Pengangkutan Zat Radioaktif (Pertama)*. BATAN Press.
- Irawati, Z. (2008). Perkembangan dan Prospek Proses Radiasi Pangan di Indonesia. *Jurnal Teknologi Dan Industri Pangan*, XIX (2), 170–176.

- Kodrat, H., Susworo, R., Amalia, T., & Sabariani, R. R. (2016). Radioterapi Konformal Tiga Dimensi dengan Pesawat Cobalt-60. *Radioterapi & Onkologi Indonesia*, 7(1), 37–42. <https://doi.org/10.32532/jori.v7i1.43>
- Oktora SR, O. H. (2016). Penurunan Kandungan Kobalt-60 Air Sumur Kampus Diploma Teknik Undip Setelah Melalui Alat Demineralizer Menggunakan Metode Analisa Spektrofotometer (Decreasing Cobalt Co Content of Well Water in Diploma Engineering After Through Demineralizer and analyzed. *Undergraduate Thesis*.
- Pilendia, D. (2020). Pemanfaatan Adobe Flash Sebagai Dasar Pengembangan Bahan Ajar Fisika: Studi Literatur. *Jurnal Tunas Pendidikan*, 2(2), 1–10. <https://doi.org/10.52060/pgsd.v2i2.255>
- Renardi, R. (2018). *Analisis Kegagalan Ring Segment Cobalt Base Superalloys X40 Pada Turbin Gas Pembangkit Listrik Pt. X* [Institut Teknologi Sepuluh November].
- Ridwan, M., AM, S., Ulum, B., & Muhammad, F. (2021). Pentingnya Penerapan Literature Review pada Penelitian Ilmiah. *Jurnal Masohi*, 2(1), 42. <https://doi.org/10.36339/jmas.v2i1.427>
- Romli, M. (2022). *Reuse Limbah Radioaktif dan Potensi Recycle*. Instalasi Pengelolaan Limbah Radioactive: BRIN. [youtube.com/watch?v=ESy6dsCnVyM](https://www.youtube.com/watch?v=ESy6dsCnVyM)
- Sari, N. M. P., Sutapa, G. N., & Gunawan, A. A. N. (2020). Pemanfaatan Radiasi Gamma Co-60 untuk Pemuliaan Tanaman Cabai (*Capsicum annum L.*) dengan Metode Mutagen Fisik. *Buletin Fisika*, 21(2), 47–52.
- Swamardika, I. B. A. (2009). Pengaruh Radiasi Gelombang Elektromagnetik Terhadap Kesehatan Manusia (Suatu Kajian Pustaka). *Majalah Ilmiah Teknologi Elektro*, 8(1), 106–109.
- Trisnawati, N. L. P. (2017). Hubungan Waktu Penyinaran Dengan Penurunan Laju Dosis Zat Radioaktif Cobalt-60. In *Universitas Udayana* (p. 32 Halaman). https://simdos.unud.ac.id/uploads/file_penelitian_1_dir/8393041b9047b56e640bcde836aa0a10.pdf
- Widodo, S., Muhammad, S., & Djarwanti, R. (2017). Kajian Proses Daur Ulang Zat Radioaktif Terbungkus Cobalt-60 “Yang Sudah Tidak Digunakan” Untuk Logging Minyak dan Batubara. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah XV - 2017*, 57–62.