

ANALISIS KESELAMATAN RADIASI PADA KOLAM IRADIATOR “IZOTOP”

P. Zacharias, A. Jami
Pusat Rekayasa Fasilitas Nuklir - BATAN
petza@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS KESELAMATAN RADIASI PADA KOLAM IRADIATOR “IZOTOP”.
Irradiator “Izotop” buatan Institute of Isotope Co.Ltd. Hungaria merupakan irradiator gamma panorama kategori IV yang dapat beroperasi secara kontinyu dan batch. Kapasitas maksimum sumber gamma pada irradiator ini adalah 2 MCi. Kolam penyimpan sumber berukuran lebar 2,8 m, panjang 3,6 m, dan kedalaman 6 m berisikan air bebas mineral. Rak sumber berukuran panjang 3 m dan tinggi 1 m. Jarak antara permukaan air kolam dan rak sumber menentukan fungsi air sebagai perisai radiasi. Konsep jarak ini digunakan untuk mengevaluasi keselamatan radiasi kolam Irradiator “Izotop”. Pasal 8 dari SSG-8 IAEA digunakan sebagai referensi untuk analisis ini. Penentuan faktor build –up air menggunakan Persamaan Taylor. Perhitungan laju dosis di atas kolam dilakukan untuk masing-masing tingkat permukaan air, yaitu pada tingkat air normal, dan untuk setiap 0,3 m penurunan permukaan air hingga penurunan sampai 1,5 m. Pada tingkat air normal sampai penurunan permukaan air 1,2 m, hasil perhitungan menunjukkan laju dosis sangat aman. Keadaan laju dosis radiasi mencapai tingkat tidak aman ketika penurunan tingkat air lebih dari 1,2 m. Hasil evaluasi ini memberikan gambaran bahwa desain kolam Irradiator “Izotop” dapat memenuhi rekomendasi IAEA. Berdasarkan rekomendasi ini, pada operasi normal irradiator gamma kategori IV, proses make – up air harus dilakukan ketika permukaan air berada di batas normal bawah, sehingga kejadian tidak aman tidak terjadi.

Kata kunci : *Irradiator “Izotop”, kolam irradiator, laju dosis, keselamatan radiasi*

ABSTRACT

RADIATION SAFETY ANALYSIS ON THE “IZOTOP” IRRADIATOR POOL.
“Izotop” Irradiator manufactured by Institute of Isotope Co. ltd. Hungary is a category IV panoramic gamma irradiators which can operate in both continuous and batch modes. The maximum gamma source capacity of the irradiator is 2 MCi. The dimension of the source storage pool containing demineralized water is about 6 m in deep, 2.8 m in wide and 3.6 m in length. The source rack is about 3 m in length and 1 m in height. The distance between the surface of the pool water and the source rack defines the water as radiation shielding. The distance is used to evaluate the radiation safety of the “Izotop” Irradiator pool. Article 8 of the IAEA SSG-8 is used as reference for this analysis. Determination of water build-up factor uses Taylor's formula. The calculation of the dose rate at the border of the pool was done for each of the water level, ie. at the normal water level, and for each 0.3 m drop in water level decreasing until 1.5 m. At normal water levels, and up to 1.2 m of drop in water level, the result shows a very safe dose rate levels. The radiation dose rate reaches unsafe level when the water level decreases more than 1.2 m. The results of this evaluation shows that “Izotop” Irradiators pool design can meet IAEA recommendations. Based on these recommendations, in normal operation of gamma irradiators category IV, the make - up of water shall be operated when the water level is in the normal low water level, so that the unsafe incidence will not happen.

Keywords: *“Izotop” Irradiators, irradiator pool, dose rate, radiation safety.*

1. PENDAHULUAN

Servo Multipurpose Tote-box type Gamma Irradiation Facility produksi *Institute of Isotopes Co.Ltd. Hongary*^[1] (selanjutnya disebut Iradiator “Izotop”) merupakan iradiator gamma panorama katagori IV. Iradiator gamma kategori IV menganut konsep bahwa akses masuk manusia ke ruang iradiasi terkendali, di mana sumber gamma tertutup disimpan dalam kolam air. Sumber sepenuhnya terlindungi saat tidak digunakan dan terbuka saat sedang bekerja mengiradiasi produk sehingga harus dijaga agar tidak dapat diakses dengan menggunakan sistem kendali masuk *interlock*. Jika ada intervensi saat iradiator bekerja, maka sistem interlok aktif, yang mengakibatkan rak sumber bergerak turun ke posisi aman di dalam kolam. Pada prosedur operasi normal, operator dibolehkan masuk ke ruang iradiasi hanya jika kondisi ruang iradiasi sudah dinyatakan aman oleh sistem kendali. Kondisi aman ditinjau dari dua parameter, yaitu konsentrasi ozon dan tingkat radiasi rendah karena sumber sudah berada di posisi aman di dalam kolam.

Kolam berisi air bebas mineral berfungsi sebagai perisai radiasi dan sekaligus sebagai pendingin sumber Co-60. Sebagai perisai radiasi, kedalaman air yang diukur antara sumber ke permukaan air kolam, menjadi variabel penting mengingat volume air kolam dapat berkurang akibat adanya kebocoran *liner* dan penguapan baik alami maupun karena *gamma heating*. Karena itu perlu dilakukan analisis keselamatan radiasi terhadap desain kolam Iradiator “Izotop”, pertama untuk mengetahui apakah desain memenuhi regulasi Bapeten^[2] dan atau rekomendasi dari SSG-8 IAEA^[3], dan kedua untuk mendapatkan titik kritis di mana air kolam kehilangan fungsinya sebagai perisai radiasi.

2. METODE

Liner kolam Iradiator “Izotop” bergeometri *rectangular* dengan ukuran lebar adalah 2,8 m, panjang 3,6 m dan kedalaman 6 m. Rak sumber berukuran panjang 3 m dan tinggi 1 m. Posisi rak sumber saat berada di dalam kolam dapat dilihat pada Gambar1. Rak sumber berjarak 0,4 m dari sisi kanan *liner*. Rekomendasi dari SSG-8 digunakan sebagai acuan untuk analisis ini. Dari butir 8.80 SSG-8 dinyatakan bahwa permukaan normal air kolam memiliki dua tingkat permukaan, yaitu tingkat permukaan normal atas (*normal high water level*) dan tingkat permukaan normal bawah (*normal low water level*). Butir 8.83 merekomendasikan adanya sinyal pemberitahuan (ke operator) bila penurunan permukaan air dapat menyebabkan kegagalan fungsi air sebagai perisai radiasi, kira-kira mendekati 30 cm di bawah batas normal bawah. Dan butir 8.89 tentang sistem perpipaan untuk kendali permukaan air dan kendali kualitas air harus menggunakan *siphon breakers* terutama untuk permukaan air lebih rendah 30 cm dari batas normal *make-up* air. Ujung pipa hisap untuk sirkulasi air kolam harus tidak lebih rendah 30 cm di bawah batas normal *make-up* air.

Evaluasi dilakukan terhadap posisi tingkat permukaan air di posisi normal, di posisi 0,3 m di bawah batas normal bawah, dan di posisi di mana air kehilangan fungsi sebagai perisai radiasi. Evaluasi dilakukan dengan perhitungan besar laju dosis radiasi di atas kolam di titik P₁ dan P₂ Gambar 1 saat sumber di posisi aman.

Perhitungan laju dosis di batas atas kolam mengikuti kondisi berikut ini.

1. Sumber Co-60 dipandang sebagai sumber *punctiform*. Sumber berada di tengah rak sumber dengan aktivitas 2000 KCi (aktivitas maksimum iradiator “Izotop”), berada pada posisi aman dalam kolam
2. Atenuasi radiasi diabaikan pada sumber pensil, modul, dan rak
3. Titik acuan perhitungan laju dosis adalah 0,3 m di atas batas normal atas air kolam (lihat Gambar 1).

Laju dosis radiasi di atas kolam di titik P₂ (sisi kanan) dihitung menggunakan Persamaan 1^[4,5] yaitu:

$$H = \frac{\Gamma \cdot A}{R^2} B \cdot e^{-(\mu/\rho) \cdot d \cdot L} \text{ mSv/h} \dots\dots\dots (1)$$

Dengan:

- H : Laju dosis radiasi, mSv/h
- Γ : Faktor gamma untuk Co-60 = 0,351 mSv.m²/h.GBq
- A : Aktivitas sumber Co-60, GBq
- R : Jarak titik P ke sumber, m
- B : Faktor *Build-up* dalam medium air.
- $\frac{\mu}{\rho}$: Koefisien attenuasi massa untuk photon 1.33 MeV (0.0612 cm²/g)
- d : Densitas medium (1 g/cm³)
- L : Jarak dari sumber ke permukaan air, berhimpit dengan garis sumber ke

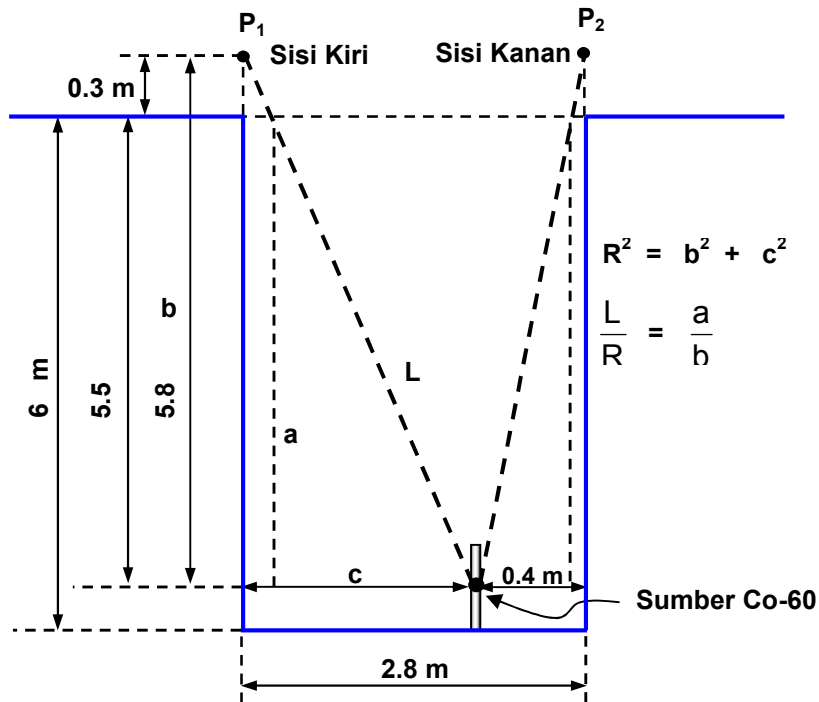
P₂

Perhitungan faktor *Build-up* menggunakan Persamaan Taylor ^[4,5,6] berikut.

$$B(\mu \cdot L) = A_1 \cdot e^{-\alpha_1 \cdot \mu \cdot L} + (1-A_1) \cdot e^{-\alpha_2 \cdot \mu \cdot L} \dots\dots\dots (2)$$

Untuk air dan energy photon 1,33 MeV

- A₁ = 17,2949
- α_1 = -0,0781



Gambar 1. Skema Lokasi Sumber Dalam Kolam Iradiator

- α_2 = -0.0232
- μ = Koefisien attenuasi linier untuk air dengan $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$
- = 0.0612 cm⁻¹

Sehingga Persamaan Taylor di atas menjadi

$$B(\mu.L) = 17.2949 e^{0.00478.L} - 16.2949. e^{0.00142.L}$$

3. PERHITUNGAN LAJU DOSIS RADIASI DI ATAS KOLAM

Perhitungan laju dosis radiasi dilakukan dengan menggunakan aktivitas maksimum Iradiator “Izotop”, yaitu 2000 kCi ($7,4 \times 10^7$ GBq). Nilai laju dosis tersebut kemudian dibandingkan dengan batas laju dosis radiasi di atas kolam, yaitu tidak lebih dari 25 $\mu\text{Sv/jam}^2$) dan batas dosis efektif rata-rata pekerja radiasi, yaitu tidak lebih dari 20 mSv/tahun^[7] . Selain itu, dibandingkan juga dengan dosis rata-rata radiasi alam dunia, yang diasumsikan sebesar 2,4 mSv/tahun^[8].

Tingkat normal air kolam sesuai dengan SSG-8 memiliki batas normal atas dan batas normal bawah. Pada tingkat normal atas kedalaman kolam air adalah 6 m. Jarak permukaan air antara batas normal atas dan normal bawah diasumsikan sebesar 0,3 m.

Posisi rak sumber Co-60 di dalam kolam Iradiator “Izotop” seperti tampak pada Gambar 1. Tinggi rak sumber adalah 1 m dan berjarak 0,4 m dari sisi bagian kanan kolam. Dengan kedudukan sumber seperti ini, maka jarak sumber ke permukaan air pada sisi bagian kanan (L_{kanan}) selalu lebih kecil dari sisi kiri kolam (L_{kiri}), sehingga atenuasi radiasi oleh air pada sisi kanan kolam akan lebih kecil, atau laju dosis radiasi di sisi kanan selalu lebih besar. Berdasarkan keadaan ini analisis keselamatan radiasi kolam Iradiator “Izotop” dilakukan hanya pada sisi bagian kanan.

3.1. Permukaan air kolam pada tingkat normal atas

Perhitungan laju dosis radiasi berdasarkan Gambar 1. Karena tinggi rak sumber adalah satu meter dan rak sumber berjarak 0,4 m dari sisi bagian kanan kolam, maka didapat :

$$\begin{aligned} R^2 &= 0.4^2 + 5.8^2 \\ &= 33.8 \\ R &= 5.81 \text{ m,} \\ a &= 6 - 0.5 \\ &= 5.5 \text{ m} \end{aligned}$$

dan

$$\begin{aligned} \frac{L}{5.81} &= \frac{5.5}{5.8} \\ L_{\text{kanan}} &= 5,51 \text{ m} = 551 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Faktor Build-up, } B &= 17.2949.e^{0.00478 \times 551} - 16.2949.e^{0.00142 \times 551} \\ &= 589 \end{aligned}$$

Laju dosis di atas kolam (di titik P_2), H

$$\begin{aligned} H &= \frac{0.351 \times 7.4 \times 10^7}{5.81^2} 589.e^{-0.0612 \times 1 \times 551} \\ &= 1,0 \times 10^{-6} \text{ mSv/jam} \\ &= 10 \times 10^{-4} \text{ } \mu\text{Sv/jam} \\ &= 8,8 \times 10^{-3} \text{ mSv/tahun} \end{aligned}$$

Hasil perhitungan ini menunjukkan bahwa laju dosis di atas kolam (sebesar $10 \times 10^{-4} \mu\text{Sv/jam}$) lebih kecil dari $25 \mu\text{Sv/jam}$. Desain ini memenuhi persyaratan Bapeten. Nilai ini juga jauh lebih kecil dari asumsi laju rata-rata di seluruh dunia paparan radiasi alam yaitu $2,4 \text{ mSv/tahun}$. Dan juga penambahan laju dosis sebesar $8,8 \times 10^{-3} \text{ mSv/tahun}$ tidak signifikan untuk pekerja radiasi yang batasan dosis rata-rata pekerja radiasi adalah 20 mSv/tahun .

3.2. Permukaan air kolam pada batas normal bawah

Pada batas normal bawah, kedalaman kolam adalah $5,7 \text{ m}$, sehingga berlaku :

$$\begin{aligned} a &= 5,7 - 0,5 \\ &= 5,2 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\frac{L}{5,81} = \frac{5,2}{5,8}$$

$$L = 521 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} \text{Faktor Build-up } B &= 17.2949.e^{0.00478 \times 521} - 16.2949.e^{0.00142 \times 521} \\ &= 556 \end{aligned}$$

Laju dosis di atas kolam, H.

$$\begin{aligned} H &= \frac{0.351 \times 7,4 \times 10^7}{5,81^2} 556.e^{-0.0612 \times 1 \times 521} \\ &= 5,97 \times 10^{-6} \text{ mSv/jam} \\ &= 59,7 \times 10^{-4} \mu\text{Sv/jam} \\ &= 5,23 \times 10^{-2} \text{ mSv/tahun} \end{aligned}$$

Laju dosis radiasi di atas kolam lebih rendah dari $25 \mu\text{Sv/jam}$. Penambahan laju dosis sebesar $5,23 \times 10^{-2} \text{ mSv/tahun}$ tidak berpengaruh secara signifikan terhadap laju rata-rata paparan radiasi alam yaitu $2,4 \text{ mSv/tahun}$. Dengan laju dosis yang dihasilkan hanya sebesar ini, menunjukkan bahwa desain kolam iradiator "Izotop" memenuhi persyaratan keselamatan radiasi.

3.3. Permukaan air kolam berada di 0,3 m di bawah batas normal bawah

Perhitungan untuk pemeriksaan laju dosis dilakukan pada $0,3 \text{ m}$ di bawah batas normal bawah. Pada batas ini, berdasarkan rekomendasi pada butir 8.78 dan 8.89 SSG-8, merupakan batas pemasangan ujung pipa hisap. Dan pada sistem kendali permukaan air maupun kendali kualitas air perlu dipasang *siphon breaker*. Kedalaman air kolam adalah $5,4 \text{ m}$, dan berlaku :

$$\begin{aligned} a &= 5,4 - 0,5 \\ &= 4,9 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\frac{L}{5,81} = \frac{4,9}{5,8}$$

$$L = 491 \text{ cm}$$

$$\begin{aligned} \text{Faktor Build-up } B &= 17.2949.e^{0.00478 \times 491} - 16.2949.e^{0.00142 \times 491} \\ &= 524 \end{aligned}$$

Besar laju dosis di atas kolam

$$\begin{aligned} H &= \frac{0.351 \times 7.4 \times 10^7}{5.81^2} 524.e^{-0.0612 \times 1 \times 491} \\ &= 3,55 \times 10^{-5} \text{ mSv/jam} \\ &= 35,5 \times 10^{-3} \text{ } \mu\text{Sv/jam.} \\ &= 0,31 \text{ mSv/tahun} \end{aligned}$$

Laju dosis radiasi di atas kolam lebih rendah dari 25 $\mu\text{Sv/jam}$. Penambahan laju dosis sebesar ini dianggap tidak berpengaruh secara signifikan terhadap laju dosis radiasi alam.

3.4. Permukaan air kolam berada di 0,6 m di bawah batas normal bawah

Perhitungan laju dosis radiasi di atas kolam diteruskan hingga penurunan permukaan air mencapai 0,6 m di bawah batas normal bawah atau pada kedalaman kolam 5,1 m. SSG-8 sudah tidak merekomendasikan air kolam turun sejauh ini. Dari Gambar 1 didapat sebagai berikut.

$$\begin{aligned} a &= 5.1 - 0.5 \\ &= 4.6 \text{ m} \\ \frac{L}{5.81} &= \frac{4.6}{5.8} \\ L &= 461 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Build-up, } B &= 17.2949.e^{0.00478 \times 461} - 16.2949.e^{0.00142 \times 461} \\ &= 492 \end{aligned}$$

Laju dosis di atas kolam

$$\begin{aligned} H &= \frac{0.351 \times 7.4 \times 10^7}{5.81^2} 492.e^{-0.0612 \times 1 \times 461} \\ &= 2,10 \times 10^{-4} \text{ mSv/jam} \\ &= 21,0 \times 10^{-2} \text{ } \mu\text{Sv/jam} \\ &= 1,84 \text{ mSv/tahun} \end{aligned}$$

Nilai ini masih di bawah batas laju dosis radiasi 25 $\mu\text{Sv/jam}$. Penambahan laju dosis sebesar 1,84 mSv/tahun pada laju dosis radiasi alam masih di bawah laju dosis pekerja radiasi, sehingga pada posisi ini operator tetap aman untuk bekerja.

Dengan cara yang sama, perhitungan dilanjutkan untuk setiap penurunan permukaan air per 0,3 m hingga sejauh 1,2 m di bawah batas normal bawah (kedalaman air 4,5 m). Asumsi untuk operator boleh bekerja dalam ruang iradiasi adalah 2000 jam per tahun. Hasil perhitungan ditampilkan pada Tabel 1 di bawah ini.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kegiatan perhitungan laju dosis radiasi di atas kolam Iradiator "Izotop" merupakan cara untuk mengevaluasi desain kolam iradiator, khususnya untuk fungsi air kolam sebagai perisai radiasi. Acuan batasan tingkat permukaan air kolam mengacu pada SSG-8 yang merupakan suatu rekomendasi dari IAEA. Regulasi Bapeten yang digunakan dalam evaluasi ini adalah laju dosis radiasi di atas kolam maksimum 25 $\mu\text{Sv/jam}$, dan laju dosis radiasi untuk pekerja radiasi maksimum 20 mSv/tahun. Tabel 1

adalah ringkasan hasil perhitungan laju dosis radiasi di atas kolam pada posisi bagian kanan Gambar 1.

Tabel 1. Hasil perhitungan laju dosis setiap penurunan 0.3 m permukaan air kolam.

Tingkat permukaan air	$\mu\text{Sv/jam}$	mSv/jam	mSv/hari	mSv/tahun	$\text{mSv/2000jam operator}$
Normal atas	$10,0 \times 10^{-4}$	1.00×10^{-6}	2.41×10^{-5}	8.79×10^{-3}	-
Normal bawah	$59,7 \times 10^{-4}$	5.97×10^{-6}	1.43×10^{-4}	5.23×10^{-2}	-
-0.3 m	$35,5 \times 10^{-3}$	3.55×10^{-5}	8.51×10^{-4}	3.11×10^{-1}	-
-0.6 m	$21,0 \times 10^{-2}$	2.10×10^{-4}	5.03×10^{-3}	1.84	-
-0,9 m	$12,3 \times 10^{-1}$	1.23×10^{-3}	2.96×10^{-2}	10.82	2.47
-1.2 m	$72,4 \times 10^{-1}$	7.24×10^{-3}	1.74×10^{-1}	63.40	14.47
-1.5 m	75,8	7.58×10^{-2}	1.82	663.83	151.56

Dari Tabel 1 dapat terlihat bahwa laju dosis radiasi di atas kolam pada posisi permukaan air di tingkat normal (kedalaman air 6 m pada batas normal atas dan 5,7 m pada batas normal bawah) adalah lebih rendah dari 25 $\mu\text{Sv/jam}$ dan jauh di bawah nilai laju dosis rata-rata radiasi alam, sehingga dianggap penambahan dosis ini tidak signifikan terhadap bahaya keselamatan radiasi. Pada posisi ini air kolam Iradiator "Izotop" dapat memenuhi persyaratan Bapeten dan SSG-8. Pada operasi normal, saat permukaan air mencapai tingkat normal bawah, proses *make-up* air dilakukan. Dengan cara ini, dipastikan fungsi air sebagai perisai radiasi tetap terjaga.

Perhitungan dilanjutkan untuk posisi permukaan air berada di 0,3 m di bawah batas normal bawah atau kedalaman air turun menjadi 5,4 m. SSG-8 tidak merekomendasikan permukaan air turun hingga batas ini. Dan juga diingatkan untuk tidak boleh memasang ujung pipa hisap lebih rendah dari batas ini. Pada Tabel 1 untuk permukaan air di 0,3 m di bawah normal bawah menunjukkan bahwa laju dosis di atas kolam sebesar $3,55 \times 10^{-5}$ mSv/tahun atau $35,5 \times 10^{-3}$ $\mu\text{Sv/jam}$ yang masih memenuhi persyaratan Bapeten. Dengan demikian sampai dengan batas ini keselamatan radiasi masih terjaga, sehingga pemasangan ujung pipa hisap di batas ini masih aman. Artinya, jika terjadi malfungsi pada proses *make-up* air yang menyebabkan permukaan air turun hingga batas ini, maka fungsi air kolam sebagai perisai radiasi tetap terjaga.

Pada perhitungan untuk penurunan permukaan air hingga 1,2 m di bawah batas normal bawah (kedalaman kolam 4,5 m) diperoleh laju dosis di atas kolam masih lebih kecil dari 25 $\mu\text{Sv/jam}$. Dan laju dosis ini bila untuk operator yang bekerja 2000 jam/tahun mendapat paparan sebesar 14,47 mSv/tahun . Pada keadaan seperti ini, desain Iradiator "Izotop" masih tetap aman. Meskipun keadaan ini adalah operasi tidak normal untuk sebuah iradiator gamma. Oleh karena itu proses *make-up* air harus segera mengisi kolam hingga ke posisi batas normal air, dan operator harus memeriksa penyebab terjadi pengurangan air kolam. Operator dapat masuk ke ruang iradiasi karena jumlah laju dosis radiasi alam dan dari iradiator masih di bawah 20 mSv/tahun . Meskipun aman, SSG-8 tidak merekomendasikan keadaan seperti ini. Kondisi kritis yang tidak aman mulai terjadi untuk penurunan lebih besar dari 1,2 m.

Jika kondisi permukaan air kolam turun hingga batas tidak aman, keadaan ini dapat diketahui dari indikator *water level* dan detektor radiasi, maka yang perlu dilakukan adalah memeriksa proses *make-up* air dan melakukan pengisian air hingga tingkat normal air. Bila perlu, sumber Co-60 dipindahkan ke rak penyimpanan sementara atau *container* dan penyebab volume air kolam berkurang harus diperiksa.

5. KESIMPULAN

Dari hasil perhitungan laju dosis radiasi di atas kolam untuk beberapa tingkat permukaan air kolam pada operasi normal Iradiator "Izotop" memberikan hasil sangat aman. Bahkan masih tetap aman walaupun permukaan air sudah di luar rekomendasi SSG-8. Dengan demikian dapat dinyatakan bahwa desain kolam Iradiator "Izotop" Hungaria ini dapat memenuhi rekomendasi IAEA sesuai dengan SSG-8 dan regulasi Bapeten. Besar laju dosis radiasi di atas kolam mulai menunjukkan gejala berbahaya untuk keselamatan radiasi bila penurunan permukaan air lebih dari 1,2 m. Informasi ini dapat digunakan oleh operator fasilitas iradiator, agar keadaan tidak aman tidak terjadi pada pengoperasian Iradiator "Izotop".

6. DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Palfi Tamas, Falvi Laszlo, *Servo Multipurpose Tote-box type Gamma Irradiation Facility*, Institute of Isotopes Co.Ltd, Hungary, 2014.
- [2]. Ridwan M, *Izin Konstruksi dan Operasi Iradiator*, Perka-Bapeten, No.11/Ka-BAPETEN/VI-99, Jakarta, 1999.
- [3]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Radiation Safety of Gamma Electron And X Ray Irradiation Facilities*, Specific Safety Guide 8, IAEA, Wina, Austria, 2010.
- [4]. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, *Manual on Self-Contained Gamma Irradiator (Categories I and III)*, Practical Radiation Safety Manual, IAEA, Wina, Austria, 1996.
- [5]. Ary de A. Rodrigues Jr., *Safety Analysis of A Pool Genesis II IrradiatorTM*, International Nuclear Atlantic Conference-INAC, 2011.
- [6]. Faiedh Gittan Ibrahim, *Shield Calculation Design for Gamma-Ray Sterilizer Plant*, Journal of Um-Salama for Science, Vol.2(1), 2005.
- [7]. Lasman A. N., *Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir*, Perka Bapeten No.4 tahun 2013, Jakarta, 2013.
- [8]. United Nations Scientific Committee on The Effect of Atomic Radiation. *Sources and effects of Atomic Radiation*, V.1. United Nation, New York, USA, 2010, p.4.(UNSCEAR 2008).