

Pemantauan Konsentrasi Radionuklida Cs-137, Co-60, I-131 Serta Kualitas Air Daerah Aliran Sungai Bekasi

Dede Sukandar^{1*}, Ghulam Fathul Amri², Dasumiati³, dan Dewi Fauzih¹

¹Program Studi Kimia, UIN Syarif Hidayatullah Jakarta, Indonesia, e-mail: sukandarkimia@uinjkt.ac.id

²Pusat Riset Teknologi Keselamatan dan Metrologi dan Mutu Nuklir (PRTKMMN), Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN), Jakarta Selatan, Indonesia

³Program Studi Biologi, UIN Syarif Hidayatullah Jakarta, Indonesia

ABSTRAK

Radionuklida menjadi sesuatu yang krusial untuk diketahui penyebaran, intensitas radiasi, sumber dan proses yang mempengaruhinya di dalam air. Diantara radionuklida yang menarik perhatian adalah Cs-137, Co-60, I-131. Radionuklida Cs-137 adalah unsur radioaktif yang memiliki sifat mudah terdispersi dalam badan air, sedangkan Co-60 dan I-131 banyak digunakan untuk keperluan rumah sakit khususnya radioterapi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui konsentrasi radionuklida Cs-137, Co-60, I-131 serta kualitas air di Sungai Bekasi. Analisis karakteristik sifat air dari Sungai Bekasi adalah suhu, pH, dan Total Dissolved Solids (TDS), dan pemekatan. Pengukuran konsentrasi radionuklida Cs-137, Co-60, dan I-131 menggunakan instrumen spektrometer gamma. Hasil penelitian diperoleh konsentrasi radionuklida Cs-137, Co-60, dan I-131 adalah masing-masing berturut-turut: 0,00642 - 0,00428 Bq/L, 0,00713 - 0,01272 Bq/L dan 0,00077 - 0,00584 Bq/L. Konsentrasi radionuklida Cs-137, Co-60, I-131 masih berada di bawah batas aman (Cs-137 $1,2 \times 10^2$ Bq/L, Co-60 $1,4 \times 10^3$ Bq/L, I-131 $3,0 \times 10^5$ Bq/L) yang ditetapkan oleh Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 7 Tahun 2013. Pada penentuan kualitas air berdasarkan parameter suhu, TDS, dan pH hasil yang didapatkan masih dibawah batas aman (suhu 25-31°C, TDS 1000 mg/L, pH 6-9) dalam kategori kelas II yang ditetapkan oleh Peraturan Pemerintah No 22 Tahun 2021.

Kata kunci: Cs-137, Co-60, I-131, radionuklida, spektrometer gamma, daerah aliran sungai

ABSTRACT

Radionuclides become something that is crucial to know the distribution, radiation intensity, sources and processes that affect it in the water. Among the radionuclides of interest are Cs-137, Co-60, I-131. Radionuclide Cs-137 is a radioactive element that has properties easily dispersed in water bodies, while Co-60 and I-131 are widely used for hospital purposes, especially radiotherapy. This study aims to determine the concentration of radionuclides Cs-137, Co-60, I-131 and water quality in the Bekasi River. Analysis of the characteristics of water properties from the Bekasi River are temperature, pH, and Total Dissolved Solids (TDS), and concentration. Measurement of the concentration of radionuclides Cs-137, Co-60, and I-131 using a gamma spectrometer instrument. The results of the study obtained the concentration of radionuclides Cs-137, Co-60, and I-131 are respectively: 0.00642 - 0.00428 Bq / L, 0.00713 - 0.01272 Bq / L and 0.00077 - 0.00584 Bq / L. The concentration of radionuclides Cs-137, Co-60, I-131 is still below the safe limit set (Cs-137 $1,2 \times 10^2$ Bq/L, Co-60 $1,4 \times 10^3$ Bq/L, I-131 $3,0 \times 10^5$ Bq/L) by the Regulation of the Head of BAPETEN Number 7 of 2013. In determining water quality based on the parameters of temperature, TDS, and pH the results obtained are still below the safe limit set by stipulated (temperature 25-31°C, TDS 1000 mg/L, pH 6-9) in class II category by Government Regulation No. 22 of 2021.

Keywords: Cs-137, Co-60, I-131, radionuclide, gamma spectrometer, watershed.

Citation: Sukandar, D., Ghulam, FA., Dasumiati, dan Fauziah, D. (2025). Analisis Radionuklida Cs-137, Co-60 dan I-131 pada Sampel Air Daerah Aliran Sungai Bekasi Menggunakan Spektrometer Gamma. Jurnal Ilmu Lingkungan, 23(1), 23-34, doi:10.14710/jil.23.1.23-34

1. PENDAHULUAN

Pencemaran lingkungan merupakan suatu masalah yang memerlukan perhatian serius dari semua pihak, sehingga diharapkan dapat mengatasi dampak buruk yang kemungkinan terjadi. Salah satu dampak buruk terhadap pencemaran lingkungan akibat adanya radiasi adalah terjadinya efek radiasi.

Pencemaran radiasi yang ada di lingkungan berasal dari uji coba nuklir, siklus bahan bakar nuklir, aktivitas antropogenik, aktivitas terapi radiasi, dan sumber lainnya. Aktivitas *fallout* dari eksperimen nuklir dan industri merupakan penyebab utama aktivitas radiasi buatan untuk menghasilkan radionuklida (Aryawijayanti et al., 2016).

Definisi pencemaran adalah masuknya suatu polutan yang mengakibatkan berubahnya suatu kondisi dari keadaan awal ke keadaan memburuk. Perubahan ini terjadi disebabkan karena benda asing yang masuk dan memberikan kerugian bagi makhluk hidup yang telah hidup dengan baik dalam sebuah lingkungan (Palar, 2004). Pencemaran radioaktif dapat berasal dari beberapa macam yaitu *fallout* radioaktif dari pengujian senjata nuklir di atmosfer (70-80 % dari *fallout* jatuh ke perairan), kegiatan industri pengawet makanan, kertas dan baja yang menggunakan radionuklida dalam proses produksi, dan radionuklida dimanfaatkan dalam bidang kedokteran sebagai proses sterilisasi dan radiografi (Tusiro, 2012). Radionuklida sangat penting untuk diketahui tentang distribusi, tingkat radiasi, sumber, dan proses yang mempengaruhinya di lingkungan perairan. Beberapa diantaranya radionuklida yang mendapat perhatian adalah Cs-137, Co-60 dan I-131.

Radionuklida Cs-137 merupakan bentuk hasil atau produk fisi nuklir yang bersifat toksik tingkat tinggi, memancarkan radiasi gamma (γ) sebesar 661 keV, memiliki nomor atom 55 dengan waktu paruh sekitar 30 tahun. Jika manusia terkena paparan Cs-137 dapat memicu resiko kanker. Cs-137 termasuk unsur kimia yang bersifat radioaktif dengan memancarkan sinar gamma (γ) dan partikel beta (β) yang dapat menimbulkan bahaya bagi kesehatan makhluk hidup (Windriani et al., 2014). Jika terpapar oleh radionuklida Cs-137 kemudian masuk ke jaringan tubuh manusia melewati darah dan terdistribusi atau terserap ke jaringan, sehingga dapat menyebabkan penyakit kanker, mandul, luka bakar bahkan kematian (Rosidah, 2009).

Salah satu radionuklida yang dapat juga berasal dari fasilitas nuklir atau ledakan nuklir yaitu radionuklida Co-60. Radionuklida Co-60 merupakan pemancar radiasi gamma yang memiliki waktu paruh 5,27 tahun, nomor massa 60, energi gamma Co-60 itu ada dua yaitu 1173,238 keV dan 1332,492 keV, serta memiliki toksisitas yang tinggi (Aziz et al., 2015).

Radionuklida I-131 merupakan produk hasil fisi yang memancarkan partikel beta (10β) pada energi maksimum 0,61 MeV dan sinar gamma pada energi utama 364 keV dengan umur paruh 8,04 hari. Dengan perkembangan zaman, pemanfaatan I-131 di berbagai bidang semakin meluas. Di bidang medis, I-131 banyak digunakan sebagai radioterapi maupun radiodiagnostik di antaranya I-131 MIBG (*Metaiodobenzylguanidine*) untuk terapi kanker neuroblastoma (Kurniawati et al., 2011). Dengan semakin banyaknya pemanfaatan radionuklida I-131 dan Co-60 dalam bermacam-macam bidang, pengukuran radioaktivitas yang akurat dan tepat sangat diperlukan, sehingga radionuklida ini memberikan manfaat yang besar dengan paparan radiasi yang sekecil mungkin.

Dilakukannya pengukuran pada Sungai Bekasi yang ditinjau dari parameter kualitas air pH, Total Dissolved Solid (TDS), dan suhu untuk menentukan adanya pengaruh antara karakteristik air dengan

tingginya suatu radionuklida pada perairan tersebut. Pada penelitian (Cahyati, 2021) ditemukannya korelasi antara karakteristik air dengan penyebaran radionuklida. Hal ini dibuktikan bahwa tinggi nya nilai radionuklida juga dapat menyebabkan tinggi nya suatu pH dan TDS dalam perairan tersebut. Jika suatu perairan dinyatakan sudah tercemar oleh suatu radionuklida, maka karakteristik air nya juga ikut dapat tercemar (Cahyati, 2021).

Air yang berada di daerah aliran sungai (DAS) adalah aliran air yang mengalami fase hidrologi secara alami. Selama siklus terjadi, pergerakan air dari permukaan laut ke atmosfer, dan siklus air tanpa akhir kembali ke tanah dan kembali ke laut, air (sementara) tertahan di sungai, danau, atau waduk dan tanah untuk digunakan makhluk hidup. Daerah lahan yang sudah terbangun di DAS Bekasi telah melampaui 31,20% yang menyebar dari hulu hingga ke hilir. Sudah mencapai 27,5% yang telah dijadikan bentuk permukiman. Daerah dengan padat penduduk berada di bagian tengah hingga hilir Kali Bekasi (Dinas Lingkungan Hidup, 2018).

Menurut hasil evaluasi, keadaan sungai Bekasi telah tercemar. Hal ini ditunjukkan dengan adanya tragedi banjir tiap tahun dan adanya debit air yang menurun dan cukup terlihat perubahannya pada musim kemarau lalu. Selain itu, DAS Bekasi juga pernah terjadi bencana yang ekstrim. Pada tahun 2018, terjadi pencemaran di sungai Bekasi sampai air nya tampak berbusa, hitam dan berbau yang disebabkan karena signifikannya pencemaran yang terjadi disana selama seminggu terakhir dari bencana banjir (Prasetyo et al., 2020).

Menurut (Utami, 2005) salah satu sifat radionuklida yang mudah larut dalam air, mempermudah masuknya ke dalam akar-akar tanaman dan juga ke seluruh bagian tanaman seperti batang, daun dan buah. Radionuklida yang mencemari tanaman sampai pada manusia secara langsung bila masuk ke dalam rantai makanan, sedangkan cemarannya secara tidak langsung yaitu saat makan produk hewani seperti susu, daging, telur. Pembuangan langsung limbah cair yang terkontaminasi ke danau, badan air, sungai dan kolam tanpa pengolahan terlebih dahulu dapat menyebabkan air yang digunakan tidak layak untuk dikonsumsi manusia, menyebabkan masalah kesehatan dan membahayakan kehidupan air.

Telah dilakukan penelitian Cs-137 pada air oleh (Kusuma et al., 2016) pada air di perairan Pulau Pari dan hasilnya terdapat aktivitas Cs-137 berkisar 0,15-1,16 mBq/l, untuk aktivitas Cs-137 di sedimen berkisar 0,26-0,65 Bq/kg. Hasil ini belum menunjukkan indikasi yang membahayakan. Pada penelitian (Sinaga et al., 2015) tentang penyebaran pada radionuklida Cs-137 di muara sungai Cisadane perairan teluk Jakarta hasilnya menunjukkan bahwa Cs-137 menyebar secara dominan ke arah timur selama 15 hari di perairan Teluk Jakarta. Penelitian lain yang dilakukan (Wiratama, 2019) tentang kondisi Cs-137 di perairan teluk Jakarta dan prediksi

distribusi pada skenario insiden research reactor G.A. Siwabessy pada musim barat dengan hasil pencarian yang menunjukkan aktivitas Cs-137 di perairan 5 Teluk Jakarta berkisar antara 0,135–0,417 Bq/L. Simulasi distribusi Cs-137 di perairan Teluk Jakarta pada saat angin muson barat, menunjukkan bahwa distribusinya tersebar di arah tenggara.

Selanjutnya penelitian (Murniasih & Sukirno, 2016) tentang hasil analisis pengukuran radioaktivitas I-131 antar laboratorium di lingkungan BATAN menunjukkan bahwa laboratorium Analisis Aktivasi Neutron-Pusat Sains dan Teknologi Akselerator (AAN-PSTA) mendapatkan bahwa aktivitas I-131 sebesar $\pm 2,40$ Bq/mg. Hasil ini masih di bawah ambang batas yang cukup baik untuk mengukur radioaktivitas yang memiliki waktu paruh relatif lebih pendek dengan aktivitas rendah.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian mengenai radionuklida Cs-137, Co-60 dan I-131 penting dilakukan meskipun aktivitas nuklir masih terbatas. Hal tersebut dikarenakan arus yang bergerak di dalam perairan tersebut memungkinkan adanya kontaminasi nuklir radioaktif masuk ke dalam air, maka perlu dilakukan penelitian tentang aktivitas Cs-137, Co-60 dan I-131 yang terkandung di perairan Sungai Bekasi menggunakan Spektrometer Gamma dengan lima titik dengan sumber air berasal dari 5 kali yaitu Sungai Bekasi, Cikeas, Cileungsi, Citeureup, dan Cijanggel. Diharapkan data yang diperoleh dapat dijadikan sebagai informasi dasar masyarakat maupun pemerintah, sehingga kualitas yang baik dari DAS Bekasi dapat dipertahankan.

2. METODE PENELITIAN

2.1. Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan meliputi sampel air Sungai Bekasi, kertas saring, lem (*araldite*), kertas label, spidol, dan nitrogen cair.

Peralatan yang digunakan antara lain alat-alat gelas, indikator pH, termometer, TDS meter, beaker marinelli 1 L, corong, timbangan dan alat spektrometer gamma merk *Ortec* dengan detektor *High Purity Germanium* (HPGe).

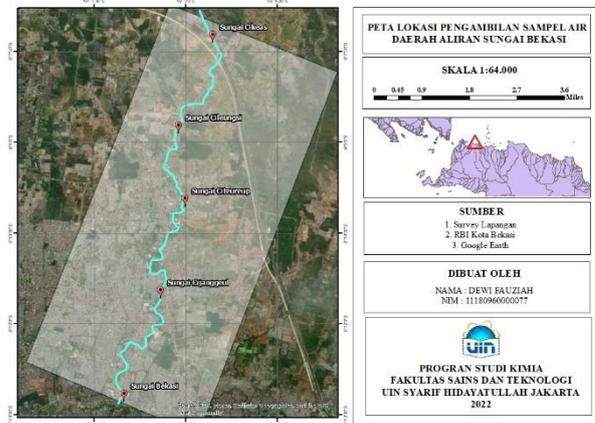
2.2. Penentuan Lokasi Sampling Air

Titik lokasi sampling air Daerah Aliran Sungai dilakukan dengan teknik purposive di lima titik Daerah Aliran Sungai dengan sumber air berasal dari 5 kali yaitu Sungai Bekasi, Cikeas, Cileungsi, Citeureup, dan Cijanggel. Teknik tersebut merupakan penentuan titik sampel dengan pertimbangan tertentu. Penentuan titik sampel dilakukan secara sengaja berdasarkan jenis air yang telah ditentukan, sehingga data yang diperoleh bersifat representatif atau benar benar mewakili populasi. Pengambilan sampel air Sungai DAS Bekasi dapat disajikan dalam peta lokasi pada Gambar 1.

2.3. Pengambilan Sampel

Metode yang digunakan pada pengambilan sampel yaitu dengan cara mengambil sampel air pada setiap

titik sampling dengan kedalaman 30 cm dari permukaan perairan hal tersebut dikarenakan agar diperolehnya gambaran kondisi perairan yang sesungguhnya. Parameter suhu, pH, dan TDS menggunakan termometer, indikator pH dan TDS meter. Pengukuran dilakukan secara langsung pada titik pengambilan sampel (in situ) (Mukarromah, 2016).



Gambar 1. Peta Lokasi Pengambilan Sampel Air

Sampel air Daerah Aliran Sungai dilakukan pada permukaan air di lima titik yaitu Sungai Bekasi, Cikeas, Cileungsi, Citeureup, dan Cijanggel pada hari yang sama dengan kurun waktu yang sama juga pada pukul 16.00–18.00 WIB. Pengambilan sampel air sebanyak 20 L dibutuhkan sampel air dengan jumlah tersebut karena konsentrasi aktivitas Cs-137, Co-60 dan I-131 di perairan memungkinkan masih sangat kecil sehingga membutuhkan jumlah yang banyak yang kemudian dipekatkan dengan evaporasi (penguapan) (Kusuma et al., 2016).

2.4. Preparasi Sampel

Beaker Marinelli 1 L disiapkan dan diberi label kode sampel. Jika sampel air Sungai Bekasi keruh maka sebaiknya proses selanjutnya yaitu penyaringan dengan menggunakan kertas saring. Sampel air tersebut dilakukan penguapan hingga volume awal air Sungai Bekasi sebanyak 20 L menjadi 1 L (BATAN, 2013).

2.5. Uji Karakteristik Air

Kualitas air dilakukan pengukuran secara in situ, pengukuran tersebut meliputi parameter suhu, TDS, dan pH air. Pada pengukuran suhu, alat yang digunakan adalah termometer gelas alkohol. Termometer gelas alkohol dicelupkan ke dalam air, ditunggu beberapa menit hingga termometer menunjukkan suhu yang konstan, angkat dan catat suhunya. Pada pengukuran pH menggunakan indikator universal yang dilengkapi warna pada peta pH. Sehelai indikator dimasukkan ke dalam air, lalu diukur pH-nya. Lalu dibandingkan dengan peta yang ada pada indikator tersebut (Mukarromah, 2016).

2.6. Kalibrasi Spektrometer Gamma

Spektrometer Gamma terlebih dahulu dikalibrasi, kalibrasi dibedakan menjadi dua yaitu kalibrasi energi dan kalibrasi efisiensi. Kalibrasi energi digunakan sebagai analisis kualitatif menggunakan spektrometer gamma. Sedangkan kalibrasi efisiensi digunakan untuk analisis kuantitatif menggunakan spektrometer gamma. Kedua kalibrasi tersebut dilakukan menggunakan sumber standar radioaktif yang diketahui aktivitasnya. Persamaan kalibrasi dapat ditulis sebagai berikut (Purwanto & Nuraeni, 2013):

$$y = ax + b \quad (1)$$

Keterangan:

y : Energi Gamma (keV)
a dan b : Bilangan konstanta linier
x : Nomor salur (channel)

$$\epsilon_y = \frac{N_S - N_{BG}}{A_t \times P_y} \quad (2)$$

Keterangan:

ϵ_y : Efisiensi pencacahan (%)
 N_S : Laju cacah standar (cps)
 N_{BG} : Laju cacah latar (cps)
 A_t : Aktivitas sumber standar pada saat pencacahan (Bq)
 P_y : Kelimpahan energi gamma (%)

2.7. Pengukuran Cacah Latar

Pengukuran cacah latar digunakan untuk melakukan koreksi pada pengukuran yang dihasilkan terhadap faktor kalibrasi alat ukur. Cacah latar sangat mempengaruhi batas deteksi dan keakuratan dalam pengukuran aktivitas tingkat rendah. Sistem cacah tersebut harus mempunyai cacah latar rendah, aktivitas latar tersebut dapat berasal dari radionuklida alam yang ada pada spektrometer gamma dan sekelilingnya, seperti dinding, lantai, dan sebagainya (BATAN, 2013).

2.8. Pengukuran Sampel

Sampel dicacah secara langsung dengan spektrometer gamma selama 3600 detik. Analisis data spektrum dilakukan dengan cara menggunakan perangkat lunak yang ada di dalam spektrometer sinar gamma yang berfungsi untuk mengetahui radionuklida apa ataupun aktivitas radionuklida yang terkandung di dalam sampel. Data yang diperoleh dari alat spektrometer gamma yaitu berupa spektrum yang akan digunakan kembali untuk menentukan jumlah konsentrasi dan radionuklida apa yang didapat pada pengukuran. Penentuan tersebut dilakukan menggunakan aplikasi software yaitu *Maestro Ortec* (BATAN, 2013).

2.9. Pengukuran Konsentrasi Aktivitas Radionuklida dalam Sampel

Konsentrasi Cs-137 ditentukan pada puncak energi 661,66 keV dengan P_γ 0,85, konsentrasi Co-60 ditentukan pada puncak energi 1173,23 keV dan 1332,50 keV dengan P_γ 0,9990 dan 0,9998, sedangkan

I-131 ditentukan pada puncak energi 364,48 keV dengan P_γ 0,8210. Persamaan konsentrasi aktivitas radionuklida dalam sampel dapat ditulis sebagai berikut (BATAN, 2013):

$$C = \frac{n_s - n_B}{\epsilon \cdot P_\gamma \cdot F_k \cdot V} \pm \mu C \quad (3)$$

Keterangan:

C : Konsentrasi radionuklida dalam sampel (Bq/L)
 n_s : Laju cacah sampel (cps)
 n_B : Laju cacah latar (cps)
 ϵ : Efisiensi pencacahan (%)
 P_γ : Kelimpahan energi gamma (%)
 F_k : Faktor koreksi serapan diri
V : Volume sampel (L)
 μC : Ketidakpastian pengukuran (Bq/L)

2.10. Ketidakpastian Pengukuran

Ketidakpastian pengukuran yaitu salah satu pengukuran kuantitatif mutu dari hasil pengukuran agar dapat dibandingkan dengan referensi, spesifikasi, atau standar. Ketidakpastian pengukuran dapat dihitung dengan persamaan yang ditulis sebagai berikut (BATAN, 2013):

$$U_T = C \sqrt{\left(\frac{uN_{sp}}{N_{sp}}\right)^2 + \left(\frac{u\epsilon}{\epsilon}\right)^2 + \left(\frac{uP_\gamma}{P_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{uW_{sp}}{W_{sp}}\right)^2} \quad (4)$$

Keterangan:

U_T : Ketidakpastian pengukuran (Bq/L)
 uN_{sp} : Ketidakpastian standar laju cacah sampel
 $u\epsilon$: Ketidakpastian efisiensi
 uP_γ : Ketidakpastian pancaran radiasi gamma
 uW : Ketidakpastian volume sampel
 N_{sp} : Laju cacah sampel (cps)

2.11. Konsentrasi Minimum Terdeteksi

Konsentrasi minimum terdeteksi menggambarkan kemampuan pengukuran suatu sistem tanpa menggunakan sampel. Apabila pengukuran yang berkaitan dengan sampel dihitung dengan persamaan *Minimum Detectable Concentration* (MDC):

$$MDC = \frac{4,66 \sqrt{n_B / t_B}}{\epsilon \times P_\gamma \times F_k \times V} \quad (5)$$

Keterangan:

MDC : Konsentrasi minimum terdeteksi
 F_k : Faktor koreksi serapan diri
 P_γ : Kelimpahan energi gamma
V : Volume sampel (L)
 ϵ : Efisiensi pencacahan (%)
 n_B : Laju cacah sampel (cps)
 t_B : Waktu cacah latar (s)

Konsentrasi minimum terdeteksi atau *Minimum Detectable Concentration* (MDC) adalah batas pengukuran dari konsentrasi radionuklida terendah yang dapat diukur. Sehingga, MDC dilakukan guna mengetahui batas konsentrasi terendah dari suatu sampel dan uji sensitivitas dengan melakukan pengukuran sampel menggunakan sistem detektor tertentu (BATAN, 2013).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik DAS Bekasi

Air merupakan sumber daya alam yang sangat dibutuhkan bagi banyak orang, bahkan semua makhluk hidup. Oleh karena itu, sumber daya air harus dijaga sehingga bisa dimanfaatkan dengan baik oleh manusia dan makhluk hidup lainnya. Kualitas air adalah sifat air serta adanya pengaruh kandungan makhluk hidup, zat, energi, atau komponen lain yang terdapat dalam air (Sujati et al., 2017). Kualitas air biasanya digambarkan oleh beberapa parameter seperti parameter fisika, meliputi suhu, TDS dan padatan terlarut. Parameter kimia meliputi oksigen terlarut, pH, salinitas, kandungan logam, BOD, dan parameter biologis seperti keberadaan plankton, bakteri, dll. sesuai dengan peraturan pemerintah Kualitas air Nomor 22 Tahun 2021 tentang Pengendalian Pencemaran. Berikut adalah hasil uji sifat fisik air DAS Bekasi.

3.1.1. Suhu

Pada uji suhu in situ perairan DAS Bekasi, tingkat suhu terendah 28,0°C di titik sampling Cijanggal. Sedangkan suhu tertinggi 29,5°C di titik sampling Bekasi, hal tersebut disebabkan karena titik sampling tersebut tidak lebih banyak pepohonan dibandingkan titik sampling lainnya. Suhu sangat mempengaruhi keberadaan organisme air menurut (Mainassy, 2017) suhu yang terlalu tinggi dapat menyebabkan kelarutan oksigen dalam air berkurang sehingga menimbulkan stress pada organisme air serta dapat meningkatkan laju metabolisme pada organisme air. Menurut (Masykur et al., 2018) hal tersebut dapat terjadi karena suhu air mempengaruhi kelarutan oksigen, yang diperlukan untuk metabolisme organisme akuatik. Semakin tinggi suhu air, semakin rendah kelarutan oksigen. Kisaran suhu optimal untuk pertumbuhan fitoplankton di perairan adalah 20°C sampai 30°C (Djoharam et al., 2018).

Berdasarkan baku mutu air PP No 22 Tahun 2021 yaitu deviasi ± 3 untuk semua kelas dari kelas I sampai kelas IV yang berarti batasan $\pm 30^\circ\text{C}$ dari suhu normal alamiah masih tergolong di bawah ambang batas (Sarif et al., 2019). Dari perbandingan tersebut maka kondisi air sungai ada di bawah ambang batas baku mutu air. Selain itu dapat diklasifikasikan ke dalam kelas I dan kelas II sehingga suhu air Sungai Bekasi masih dapat dipakai untuk memenuhi kehidupan perairan, dengan demikian kondisi suhu pada

perairan DAS Bekasi termasuk dalam kondisi normal (Hanisa et al., 2017).

3.1.2. pH

Pada uji in situ derajat keasaman air DAS Bekasi pH terendah sebesar 6 di empat titik sampling Bekasi, Cileungsi, Citeureup, dan Cijanggal, sedangkan pH tertinggi sebesar 7 di satu titik sampling yaitu Cikeas. Berubahnya pH air akan mempengaruhi perubahan suhu dan tekanan yang menyebabkan perubahan kandungan CO₂ di dalam air. Keasaman pada air umumnya disebabkan oleh gas CO₂ yang larut dalam air menjadi asam karbonat (H₂CO₃). Adanya penguapan air yang dapat menguapkan gas CO₂ dalam air sehingga pH air menjadi normal (Mukarramah, 2016). Perairan alami memiliki nilai pH berkisar antara 4-9. Perubahan pH air bergantung pada polutan yang ada pada perairan, pH pada perairan dengan nilai lebih kecil maupun lebih besar dari batas normal akan mempengaruhi kehidupan yang ada pada perairan tersebut (Sagala, 2019).

Berdasarkan baku mutu keputusan PERMENKES RI No 492 Tahun 2010 suatu perairan normal, jika memiliki nilai pH dengan kisaran 6,0-8,5. Jika dibandingkan dengan Peraturan Pemerintah (PP) No 22 tahun 2021 yaitu 6 – 9 untuk klasifikasi kelas I sampai III, dengan demikian kondisi pH pada perairan DAS Bekasi termasuk dalam kondisi normal dan masih memungkinkan bagi mikroorganisme yang mampu mendekomposisi beban pencemar atau cemaran limbah untuk tetap hidup.

3.1.3. TDS

TDS merupakan bahan-bahan terlarut dan koloid yang berupa senyawa kimia dan bahan lainnya dapat berupa ion yang biasa ditemukan dalam perairan (Yulius et al., 2018). Pada uji TDS air DAS Bekasi nilai TDS terendah 180 mg/L di titik sampling Cikeas, nilai TDS tertinggi 211 mg/L di titik sampling Citeureup. Keberadaan TDS yang tinggi pada ekosistem menyebabkan pencemaran dan kematian terhadap organisme air. Kadar TDS yang tinggi menyebabkan penghambatan sinar matahari ke kolom air sehingga berpengaruh terhadap fotosintesis di perairan jika terganggunya proses fotosintesis ini maka berkurangnya kadar oksigen dalam air (Wibowo & Rachman, 2020). Kandungan TDS pada semua titik sampling di bawah ambang batas baku mutu air kelas 1 yaitu sebesar 500 mg/L.

Tabel 1. Hasil Uji Karakteristik Air DAS Bekasi

Titik Sampling	Suhu (°C)	pH	TDS (mg/L)
Bekasi	29,7	6	196
Cikeas	28,3	7	180
Cileungsi	28,2	6	205
Citeureup	29,5	6	211
Cijanggal	28,0	6	189

Berdasarkan pernyataan (Mukarromah, 2016) bahwa nilai TDS terukur 1000 mg/L termasuk dalam fresh water, sehingga air di DAS Bekasi ini dapat diklasifikasikan sebagai air bersih (*fresh water*). Jika dibandingkan dengan PP No 22 tahun 2021 maka kondisi air sungai tersebut berada dibawah ambang batas baku mutu air, dan diklasifikasikan ke dalam kelas I dan kelas II yang tergolong aman untuk menunjang kegiatan dan kehidupan manusia. Nilai angka TDS yang masih sangat kecil menunjukkan bahwa zat padat yang terlarut dalam air tidak begitu besar namun cukup beresiko karena dapat membatasi pertumbuhan dalam air dan juga dapat membawa kematian bagi makhluk hidup. Hal ini dikarenakan zat yang terlarut dalam air biasanya berupa zat organik maupun anorganik seperti nitrat, nitrit, natrium, klorida dan lain-lain yang masih digunakan oleh makhluk hidup di dalam sungai untuk berfotosintesis maupun untuk pertumbuhan.

Pada penelitian sebelumnya tentang pengukuran karakteristik air dan konsentrasi radionuklida pada Sungai Ciliwung didapatkan korelasi antara pH dan TDS. Dimana semakin tinggi nilai pH maka semakin tinggi juga konsentrasi radionuklida Cs-137 dan I-131 yang didapatkan. Begitu juga dengan pengukuran karakteristik air yang dilakukan di Sungai BKT, dimana hasil yang didapatkan berupa semakin tinggi nilai TDS maka semakin tinggi juga nilai konsentrasi radionuklida Co-60. Hal tersebut dapat dikatakan bahwa tinggi nya nilai radionuklida juga dapat menyebabkan tinggi nya suatu pH dan TDS dalam perairan tersebut. Jika suatu perairan dinyatakan sudah tercemar oleh suatu radionuklida maka karakteristik air nya juga ikut dapat tercemar. Tetapi pada penelitian kali ini tidak ditemukannya korelasi antara tingginya konsentrasi parameter kualitas air dengan konsentrasi radionuklida yang didapatkan. Hal ini dikarenakan konsentrasi radionuklida yang didapatkan sangatlah kecil dibandingkan penelitian sebelumnya. Oleh karena itu sulit ditemukan adanya pengaruh tinggi nya suhu, TDS, maupun pH dengan konsentrasi radionuklida yang didapatkan.

3.2. Kalibrasi Energi

Pengukuran kalibrasi energi gamma merupakan analisis kualitatif yang bertujuan untuk mengetahui kondisi latar atau *background* dari ruang pencacahan dengan menggunakan sumber standar (Noviarty et al., 2017). Kalibrasi energi digunakan untuk analisis kuantitatif dengan mengetahui unsur zat radioaktif (Yusro et al., 2017). Kalibrasi energi bertujuan dalam menganalisis secara kualitatif atau untuk mengetahui unsur radioaktif, mengontrol alat spektrometer gamma sehingga meminimalisir terjadinya pergeseran energi dalam mengidentifikasi energi gamma yang dipancarkan oleh radionuklida pada sumber standar ataupun sampel dengan karakteristik energi gamma yang berbeda - beda di setiap jenis nuklida. Pencacahan dilakukan dari sumber energi rendah hingga tingkat energi tinggi agar memiliki

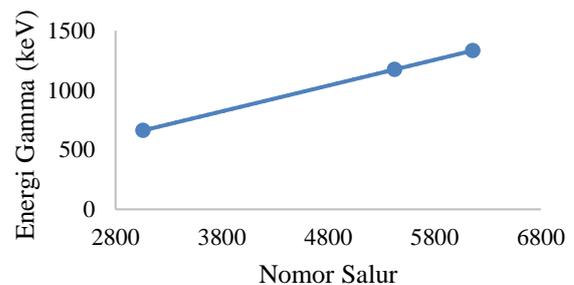
jangkauan energi yang cukup lebar (Wijono & Rosdiani, 2006).

Kalibrasi energi menunjukkan hasil yang baik apabila kurva yang dihasilkan membentuk garis lurus linier atau koefisien korelasi mendekati 1, yang nantinya digunakan untuk menentukan energi gamma dari spektrum hasil pencacahan. Energi gamma yang dihasilkan tersebut yang digunakan untuk menentukan radionuklida yang ada di dalam sampel, dikarenakan masing-masing radionuklida memiliki energi gamma yang berbeda-beda dan bersifat spesifik (BATAN, 2013). Kalibrasi energi dilakukan dengan menggunakan sumber *mix* gamma dan EW 679. Energi awal masing-masing dari Cs-137 dan Co-60 yaitu 661,66, 1173,37 dan 1332,5 KeV, diketahui konsentrasi awalnya yaitu Cs-137 sebesar 1806,6 Bq/Kg dan Co-60 142,9 Bq/Kg yang dijelaskan pada Tabel 2.

Table 2. Kalibrasi Energi Sumber Standar EW-679

Nuklida	No Salur	Energi (KeV)
Cs-137	2648	661.657
Co-60	4695	1173.228
Co-60	5333	1332.492

Kalibrasi energi kemudian dicari hubungannya antara nomor salur dengan energi sinar gamma yang biasa (Luhur et al., 2013). Nilai cacah dengan tinggi yang sama dicatat dalam suatu salur dengan nomor tertentu yang biasa disebut nomor salur. Oleh karena itu, nomor salur penganalisis salur ganda juga sebanding dengan energi sinar gamma. Nomor salur merupakan puncak serapan yang didapatkan dari radionuklida yang diukur pada spektrometer gamma. Dari hasil pencacahan diperoleh grafik spektrum energi.



Gambar 2. Kurva Kalibrasi Energi

Pada Gambar 2 kurva kalibrasi energi yang mempunyai 3 titik puncak dapat dinyatakan bahwa hubungan antara energi dan nomor salur pada radionuklida standar diperoleh garis linier, dibuktikan dengan nilai penyimpangan tiap titik terhadap garis kurva sebesar $R^2 = 1$ dengan persamaan kurva kalibrasi energi tersebut yaitu $y = 0,216x - 2,0985$ dimana $x =$ nomor salur dan $y =$ energi dalam satuan keV. Nilai koefisien regresi (R^2) yang didapatkan mendekati 1 hal ini menunjukkan bahwa korelasi antara nomor salur dan ketepatan data ukur berbanding lurus, kinerja dari detektor tersebut dapat

diartikan sangat baik karena sangat akurat (Noviarty & Haryanti, 2016).

3.3. Kalibrasi Efisiensi

Kalibrasi efisiensi pada sistem spektrometer gamma digunakan untuk analisis kuantitatif. Analisis kuantitatif bertujuan untuk mendapatkan nilai efisiensi yang digunakan untuk menentukan konsentrasi radionuklida dalam sampel. Besarnya efisiensi ditentukan berdasarkan nilai cacah persatuan waktu (detik), aktivitas sumber standar serta probabilitas pancaran sinar gamma (*yield*) (Wijono & Rosdiani, 2006). Kalibrasi efisiensi diukur dengan cara mencacah sumber standar yang sudah diketahui aktivitasnya. Kalibrasi efisiensi pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan dua jenis sumber standar yang diperoleh dari puncak hasil pencacahan Cs-137 dan Co-60.

Kurva kalibrasi efisiensi dihasilkan dengan mengukur sumber standar radioaktif yang diketahui aktivitasnya. Spektrum gamma dapat membantu peneliti untuk mengetahui *counts per second* (cps) dari setiap puncak pada energi tertentu dengan mencari net area dari puncak tersebut dibagi dengan hitungan waktu dalam detik (Suparman et al., 2008). Hasil dari kalibrasi efisiensi dilakukan dengan menggunakan spektrometer gamma dengan detektor HPGe EW-679 dengan *software Maestro* yang dilakukan selama 3600 detik (Wahyudi et al., 2017).

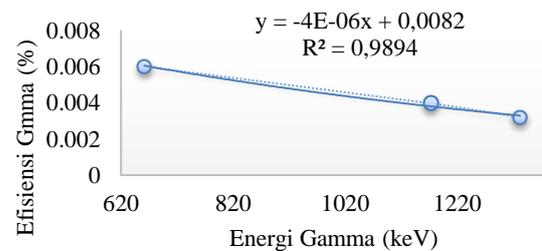
Pencacahan kembali terhadap sumber standar yang digunakan yakni untuk melihat kelayakan dari sumber standar sebelum dilakukan pencacahan lebih lanjut pada sampel dengan mengetahui aktivitas dari radionuklida pada sumber standar tersebut. Setiap radionuklida dapat memancarkan sinar radioaktif ke segala arah, sehingga untuk mengetahui besaran nilai radioaktivitas pada radionuklida dilakukan penentuan kalibrasi efisiensi dengan melakukan pengukuran pada jarak tertentu dengan menggunakan suatu alat detektor. Pengukuran tersebut juga bertujuan mengetahui efektivitas dari alat detektor dalam menangkap radiasi pemancar sinar gamma yang berasal dari radionuklida (Candra et al., 2010).

Nilai efisiensi pencacahan dapat dihitung apabila telah diketahui aktivitas sumber standar pada saat pencacahan. Pencacahan dan perhitungan aktivitas sumber standar ini diukur pada tanggal 20 Juni 2020 dengan waktu tunda 555 hari untuk sumber standar EW-679 menggunakan alat spektrometer gamma dengan detektor HPGe. Pencacahan kembali sumber standar ini dilakukan untuk mengetahui aktivitas dari radionuklida yang akan digunakan sebagai sumber standar, apakah masih dapat digunakan sebagai sumber standar atau tidak (Brahmana, 2017).

Kalibrasi efisiensi digunakan karena setiap radionuklida selalu memancarkan sinar radioaktif ke

segala arah, oleh karena itu untuk mengetahui nilai radioaktivitas dari radionuklida maka perlu dilakukan pengukuran pada jarak tertentu dari suatu detektor. Oleh sebab itu, perlunya menentukan nilai dari efisiensi detektor terhadap sinar gamma radionuklida untuk mengetahui apakah detektor mampu menangkap sinar gamma dari radionuklida (Candra et al., 2010). Pada penelitian kali ini sumber standard yang digunakan untuk kalibrasi efisiensi yaitu *Mix Gamma* dan EW 679 dan program *Maestro ortec*. Aktivitas awal itu sendiri Cs-137 dan Co-60 masing-masing adalah 1806,6 Bq/Kg dan 142,9 Bq/Kg dengan pencacahan standar pertama kali yaitu 10 Juni 2020 dan dicacah lagi pada 17 Desember 2021. Hasil kalibrasi efisiensi dapat dilihat pada Tabel 3.

Kalibrasi efisiensi dilakukan dengan menggunakan energi gamma yang diperoleh dari puncak hasil pencacahan Cs-137 dan Co-60 (Sari & Budi, 2017) yang disajikan dalam Tabel 3. Nilai efisiensi pada masing-masing tingkat energi radionuklida dapat diperoleh dengan memasukkan data-data cps, yield, dan aktivitas sumber radioaktif standar pada saat pencacahan (Wijono & Rosdiani, 2006).



Gambar 3. Kurva Kalibrasi Efisiensi

Kurva kalibrasi efisiensi pada Gambar 3 menunjukkan hubungan antara nilai efisiensi dengan energi pada sinar gamma (keV). Persamaan kurva kalibrasi efisiensi telah ditentukan dengan ordinat y adalah fungsi dari absis x, dimana y adalah distribusi perhitungan efisiensi dan x adalah energi gamma (keV) (Wijono & Rosdiani, 2006). Kurva kalibrasi efisiensi sumber standar pada Gambar 7. diperoleh persamaan dengan $y = -4E-06x + 0,0082$ dimana y adalah efisiensi pengukuran dan x adalah energi dengan nilai $R^2 = 0.9894$. Menurut (Noviarty & Haryanti, 2016) apabila nilai koefisien korelasi lebih besar dari 0,98 maka hasil linearitas yang baik ditunjukkan dengan nilai koefisien regresi yang mendekati 1, sehingga hal ini menunjukkan keakuratan data yang diukur mendekati nilai sebenarnya. Selanjutnya spektrometer gamma dengan detektor HPGe seri GEM F5930-3 yang telah terkalibrasi dengan sumber standar Mix Gamma EW 679 dapat digunakan untuk pencacahan dan mengetahui aktivitas sampel.

Tabel 3. Pencacahan Sumber Standar

No.	Nuklida	To	Ta	t (tunda)	Ao	At
1	Cs-137	20/06/2020	17/12/2021	555	1806,06	1743,76
2	Co-60	20/06/2020	17/12/2021	555	142,90	117,02
3	Co-60	20/06/2020	17/12/2021	555	142,90	117,02

Tabel 4. Konsentrasi Radionuklida Cs-137

No.	Lokasi Sampling	Energi (keV)	Konsentrasi Radionuklida (Bq/L)	Ketidakpastian Pengukuran	Batas Deteksi Konsentrasi Minimum
1	Bekasi	661,657	-0,006420	-0,000231	0,012400
2	Cikeas	661,657	-0,003210	-0,000210	0,012400
3	Cileungsi	661,657	0,002140	0,000164	0,012400
4	Citeureup	661,657	0,004280	0,000176	0,012400
5	Cijanggal	661,657	0,002670	0,000192	0,012400

3.4. Kandungan Radionuklida Cs-137

Pada pengukuran sampel air Sungai Bekasi dengan menggunakan spektrometer gamma didapatkan hasil secara kualitatif maupun kuantitatif. Hasil pengukuran secara kualitatif didasarkan pada keberadaan puncak energi spesifik Cs-137 pada masing-masing sampel yaitu 661,64 keV (Luhur et al., 2013).

Pada konsentrasi aktivitas radionuklida Cs-137 setiap titik sampling dilakukan pencacahan setiap sampel air dengan waktu masing-masing 3600 detik tiap pencacahan dan nilai efisiensi yang sama yaitu 0,0061%. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh hasil pencacahan menunjukkan net area dari masing-masing sampel pada energi radionuklida Cs-137 yaitu 661,657 KeV maka diperoleh konsentrasi aktivitas radionuklida Cs-137 dalam sampel air pada Tabel 4.

Hasil perhitungan konsentrasi radionuklida Cs-137 pada sampel air Daerah Aliran Sungai Bekasi yang diperoleh dari Tabel 4 konsentrasi radionuklida Cs-137 berkisar antara 0,00428 Bq/L sampai dengan -0,00642 Bq/L. Konsentrasi radionuklida Cs-137 tertinggi terletak pada lokasi sampling titik 4 yaitu sebesar 0,00428 Bq/L sedangkan konsentrasi radionuklida Cs-137 terendah terletak pada lokasi sampling titik 1 yaitu sebesar -0,00642 Bq/L. Konsentrasi Cs-137 di lokasi Bekasi dan Cikeas itu negatif, artinya air sungai di kedua lokasi itu tidak mengandung konsentrasi Cs-137. Dengan demikian air di kedua sungai itu tidak tercemar radioaktif Cs-137. Net area atau luas puncak serapan total sendiri merupakan jumlah cacah yang terkandung dalam suatu puncak- γ (Luhur et al., 2013).

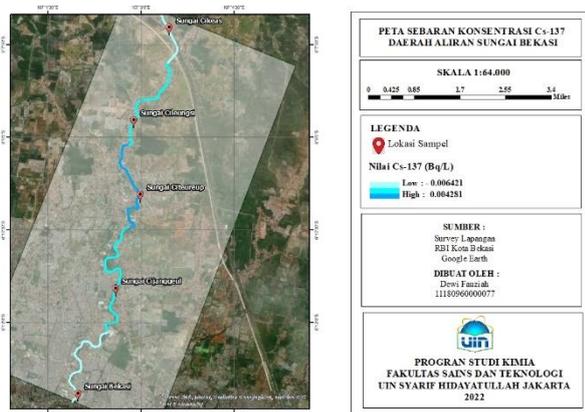
Konsentrasi radionuklida Cs-137 pada setiap titik terpantau sangatlah kecil jika dibandingkan dengan baku mutu tingkat radioaktivitas di lingkungan berdasarkan Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 7 Tahun 2013 tentang nilai batas radioaktivitas lingkungan yaitu $5,1 \times 10^3$ Bq/L kadar tertinggi yang diizinkan maka dapat disimpulkan bahwa konsentrasi radionuklida Cs-137 pada air Daerah Aliran Sungai Bekasi masih di bawah ambang batas, sehingga termasuk ke dalam kategori aman.

Berdasarkan hasil konsentrasi aktivitas radionuklida Cs-137, dapat ditentukan nilai ketidakpastian untuk mengetahui besarnya

kemungkinan kekeliruan yang terjadi dari hasil perhitungan dengan hasil yang sebenarnya. Ketidakpastian pengukuran diperoleh dengan persamaan (4), hasil nilai ketidakpastian pengukuran radionuklida Cs-137, nilai terendah 0,000164 yaitu air sungai di Cileungsi, nilai tertinggi 0,000192 yaitu sungai Cijanggal, terdapat nilai ketidakpastian dikarenakan adanya keterbatasan kemampuan alat spektrometer gamma dalam melakukan pencacahan, semakin kecil nilai ketidakpastian maka semakin teruji hasil pengukurannya (Ratnawati & Iman, 2015). menyatakan bahwa hasil pengukuran yang mempunyai kebenaran mutlak itu tidak ada satupun, meskipun alat yang digunakan sangat canggih dan kondisi lingkungan di sekitar pengukuran sangat stabil. Hal ini dikarenakan kemampuan manusia yang terbatas. Sehingga setiap kali ada hasil pengukuran, baik di bidang pengujian, analisis atau kalibrasi, dikatakan bahwa pengukuran bisa menjadi kurang tepat, tergantung banyak faktor, misalnya human error (kesalahan manusia), kalibrasi alat yang dipakai, perlunya jumlah sampel minimal 3 kali pengukuran di satu lokasi dan lain-lain.

Masuknya radionuklida ke dalam lingkungan perairan laut mengalami penyebaran dan pemadatan. Penyebaran radionuklida dipengaruhi oleh beberapa faktor yaitu arus, difusi pengadukan, pelarutan isotop, dan transpor biologi, sedangkan proses pemekatan di dapat melalui proses biologi, kimia, dan fisika. Kuat dan lemahnya penyebaran juga sangat dipengaruhi oleh tipe arus laut global (Rafsani et al., 2014) karena dinamika perairan laut menentukan pola dan jangkauan sebaran unsur radioaktif sebagai fungsi waktu (Sinaga et al., 2015).

Berdasarkan nilai konsentrasi radionuklida Cs-137 yang terdapat pada sampel air sungai daerah aliran Bekasi relatif rendah untuk setiap lokasi sampling. Hal ini disebabkan karena arus laut yang dihasilkan tidak banyak berperan dalam penyebaran radionuklida Cs-137, tetapi dikaitkan dengan efek proses jatuhnya debu global yang timbul dari radioaktivitas yang telah lama masuk ke laut yang didistribusikan secara merata oleh arus laut bumi [40]. Jika konsentrasi radionuklida Cs-137 dibuat ke dalam bentuk peta sehingga dapat diketahui seberapa besar penyebarannya pada Sungai Bekasi maka dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Peta Sebaran Konsentrasi Radionuklida Cs-137 Air DAS Bekasi

Gambar 4 menjelaskan bahwa konsentrasi radionuklida Cs-137 tertinggi terdapat pada lokasi sampel sungai Citeureup yang ditandai dengan warna biru pekat dan warna biru tersebut semakin memudar di setiap lokasi sampling. Hal ini dikarenakan konsentrasi radionuklida Cs-137 dari titik sampling lain mengalami penurunan sehingga penyebaran radionuklida Cs-137 menjadi lambat terdistribusi ke perairan sungai (Sinaga et al., 2015). Berdasarkan nilai konsentrasi radionuklida Cs-137 yang terdapat pada sampel air Sungai DAS Bekasi relatif rendah untuk setiap lokasi sampling. Hal ini dikarenakan arus yang terjadi tidak banyak berperan dalam penyebaran radionuklida Cs-137 melainkan diperoleh dari pengaruh proses *global fall out* dari radioaktif yang sudah lama masuk ke perairan atau radioaktif yang baru dan sudah tersebar secara merata oleh arus global (Silalahi & Suseno, 2014). Jatuhan zat radioaktif sisa percobaan nuklir dapat terbawa secara global termasuk ke Indonesia melalui air hujan, dan mengkontaminasi air tanah melalui infiltrasi air hujan yang terkontaminasi zat radioaktif kemudian jatuh ke permukaan tanah (BAPETEN, 2013).

3.5. Kandungan Radionuklida Co-60

Pada konsentrasi aktivitas radionuklida Co-60 setiap titik sampling dilakukan pencacahan setiap sampel air dengan waktu masing-masing 3600 detik tiap pencacahan dan nilai efisiensi yang sama yaitu 0,003%. Setelah dilakukan pencacahan selama 1 jam maka dapat diperoleh nilai net area radionuklida Co-60 pada sampel yang digunakan untuk mendapatkan

nilai konsentrasi, ketidakpastian pengukuran, dan MDC radionuklida Co-60. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan diperoleh hasil pencacahan menunjukkan net area dari masing-masing sampel pada energi radionuklida Co-60 yaitu 1173,228 keV dan 1332,492 keV maka diperoleh konsentrasi aktivitas radionuklida Co-60 dalam sampel air pada Tabel 5.

Berdasarkan hasil pencacahan maka dapat diperoleh konsentrasi radionuklida Co-60 total yang telah dirangkum pada Tabel 5 dimana konsentrasi total radionuklida Co-60 pada sampel air daerah aliran sungai Bekasi memiliki kisaran antara 0,01272 Bq/L sampai dengan 0,00556 Bq/L. Konsentrasi total radionuklida Co-60 tertinggi terdapat pada lokasi sampling titik 5 yaitu sebesar 0,01272 Bq/L sedangkan konsentrasi total radionuklida Co-60 terendah terdapat pada lokasi sampling titik 3 yaitu sebesar 0,00556 Bq/L.

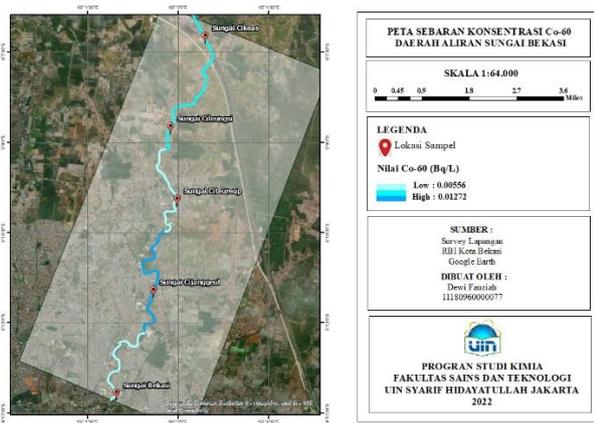
Dilihat pada Tabel 5 maka dapat dijelaskan bahwa konsentrasi total radionuklida Co-60 pada sampel di setiap lokasi sampling berada dibawah nilai MDC, hal ini berarti tidak ditemukannya atau hanya sedikit saja cemaran radionuklida Co-60 yang terdeteksi oleh detektor. Konsentrasi total radionuklida Co-60 jika dibandingkan dengan baku mutu tingkat radioaktivitas di lingkungan perairan berdasarkan Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 7 Tahun 2013 tentang nilai batas radioaktivitas lingkungan yaitu $6,0 \times 10^4$ Bq/L maka konsentrasi total radionuklida Co-60 pada sampel air Daerah Aliran Sungai Bekasi masih berada di bawah ambang batas sehingga termasuk ke dalam kategori aman.

Cobalt-60 dapat memasuki lingkungan baik dari sumber alami maupun aktivitas manusia. Cobalt secara alami ditemukan di sebagian besar tanah, batuan, udara, air, tumbuhan dan hewan dalam jumlah kecil. Cobalt di dalam tubuh manusia terakumulasi pada darah, otot, hati, paru-paru, limpa dan ginjal dan diekskresikan melalui urin dan feces dalam jumlah sedikit. Dosis yang diserap oleh tubuh sebagian besar (80-90%) memiliki waktu paruh biologis selama beberapa hari dan sebagian kecil memiliki waktu paruh selama beberapa tahun (Weber et al., 2012).

Jika konsentrasi radionuklida Co-60 dibuat ke dalam bentuk peta sehingga dapat diketahui seberapa besar penyebarannya pada Sungai Bekasi maka dapat dilihat pada Gambar 5.

Tabel 5. Konsentrasi Radionuklida Co-60

No	Lokasi Sampling	Konsentrasi Radionuklida (Bq/L)	Ketidakpastian Pengukuran	Batas Deteksi Konsentrasi Minimum
1	Bekasi	0,0087000	0,00115768	0,02257000
2	Cikeas	0,0071300	0,00021907	0,02257000
3	Cileungsi	0,0055600	0,00016767	0,02257000
4	Citeureup	0,0102700	0,00024280	0,02257000
5	Cijanggal	0,0127200	0,00038460	0,02257000



Gambar 5. Peta Sebaran Konsentrasi Radionuklida Co-60 Air DAS Bekasi

Jika dilihat dari Gambar 5 menjelaskan bahwa penyebaran konsentrasi total radionuklida Co-60 pada air Sungai DAS Bekasi sama halnya dengan penyebaran pada radionuklida Cs-137, dimana semakin kecil nilai konsentrasi total radionuklida Co-60 maka warna biru pada peta di atas semakin pudar dibandingkan dengan nilai konsentrasi total radionuklida Co-60 yang tinggi. Penyebaran konsentrasi total radionuklida Co-60 mengalami penurunan dari lokasi sampling titik pertama dan ketiga yaitu Sungai Bekasi dan Sungai Citeureup dan mengalami peningkatan di lokasi sampling Sungai Cijanggal, tetapi terjadi penurunan kembali di lokasi sampling titik Sungai Cikeas. Hasil analisis konsentrasi Co-60 pada sungai Bekasi memiliki konsentrasi cemaran yang rendah. Hal ini sesuai dengan suatu pernyataan yang menyatakan bahwa radiasi yang berasal dari percobaan nuklir di belahan bumi selatan lebih rendah dari pada belahan bumi utara (IAEA. 2001).

3.6. Kandungan Radionuklida I-131

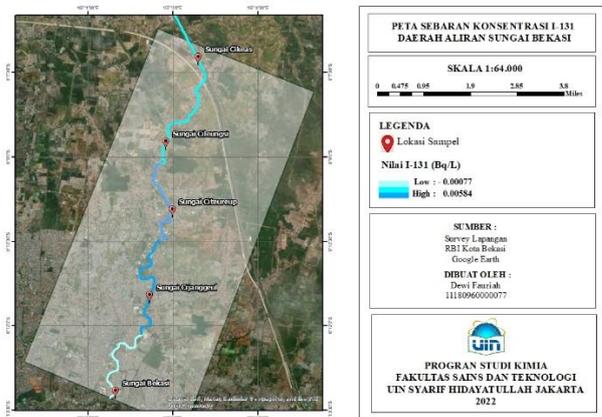
Pengukuran kandungan radionuklida I-131 pada sampel air daerah aliran sungai diukur pada energi gamma 364 keV. Dari hasil pengukuran diperoleh MDC sebesar 0,01420 Bq/kg. Secara keseluruhan dari perhitungan konsentrasi I-131 yang diukur pada air daerah aliran sungai berkisar tidak terdeteksi atau di bawah batas konsentrasi terendah (MDC) sampai dengan tertinggi sebesar 0.00584 Bq/L.

Berdasarkan hasil pengukuran sampel air Daerah Aliran Sungai Bekasi yang terdapat pada Tabel 6 diperoleh data net area sampel radionuklida I-131

sehingga dapat diketahui nilai konsentrasi radionuklida I-131 menggunakan rumus dalam Persamaan (3) yaitu berkisar antara 0.00584 Bq/L sampai dengan -0.00077 Bq/L. Konsentrasi radionuklida I-131 tertinggi terdapat pada lokasi sampling titik 1 yaitu sebesar 0.00584 Bq/L sedangkan konsentrasi radionuklida I-131 terendah terdapat pada lokasi sampling titik 5 yaitu sebesar -0.00077 Bq/L.

Dilihat dari Tabel 6 bahwa konsentrasi radionuklida I-131 dari semua titik lokasi sampling berada di bawah nilai MDC. Hal ini menunjukkan bahwa semua titik lokasi sampling tidak ada atau sedikit cemaran radionuklida I-131 yang dapat terdeteksi oleh detektor. Konsentrasi radionuklida I-131 pada setiap lokasi sampling jika dibandingkan dengan baku mutu tertinggi yang diizinkan terdapat pada lingkungan perairan berdasarkan Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 7 Tahun 2013 tentang nilai batas radioaktivitas lingkungan yaitu $1,3 \times 10^5$ Bq/L maka masih tergolong dalam kondisi aman dikarenakan hasil tersebut masih berada di bawah batas aman baku mutu. Nilai konsentrasi radionuklida pada penelitian ini dapat dijadikan untuk data dasar radioaktivitas di lingkungan perairan yang bermanfaat untuk penanggulangan, pencegahan maupun pencemaran atau kerusakan lingkungan yang diakibatkan oleh unsur radioaktif di Indonesia (Nirwana et al., 2017).

Jika konsentrasi radionuklida I-131 dibuat ke dalam bentuk peta sehingga dapat diketahui seberapa besar penyebarannya pada Daerah Aliran Sungai Bekasi maka dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Peta sebaran konsentrasi radionuklida I-131 air DAS Bekasi

Tabel 6. Konsentrasi Radionuklida I-131

No.	Lokasi Sampling	Energi (keV)	Konsentrasi Radionuklida (Bq/L)	Ketidakpastian Pengukuran	Batas Deteksi Konsentrasi Minimum
1	Bekasi	364,489	0,005840	0,000170	0,014200
2	Cikeas	364,489	0,002330	0,000145	0,014200
3	Cileungsi	364,489	0,004280	0,000165	0,014200
4	Citeureup	364,489	-0,000380	-0,000136	0,014200
5	Cijanggal	364,489	-0,000770	-0.00013	0,014200

Jika dilihat dari Gambar 6 menjelaskan bahwa penyebaran konsentrasi total radionuklida I-131 pada air Sungai DAS Bekasi sama halnya dengan penyebaran pada radionuklida Cs-137, dimana semakin kecil nilai konsentrasi total radionuklida I-131 maka warna biru pada peta di atas semakin pudar. Penyebaran konsentrasi total radionuklida I-131 mengalami penurunan dari lokasi sampling Sungai Bekasi dan mengalami peningkatan di lokasi sampling Sungai Cijanggal dan Sungai Citeureup, lalu mengalami penurunan kembali di lokasi sampling Sungai Cikeas. Hasil analisis radionuklida I-131 memiliki konsentrasi yang sangat rendah dibandingkan radionuklida lainnya, hal ini dikarenakan radionuklida I-131 memiliki waktu paruh yang pendek sehingga semakin jauh dari sumber radiasi radionuklida I-131 maka semakin berkurang radioaktivitas I-131.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa hasil penentuan kualitas air hasil berdasarkan parameter suhu berkisar antara 28 – 29,7°C, nilai TDS 180 - 211 mg/L dan nilai pH 6 – 7, telah memenuhi dan didapatkan masih dibawah ambang batas (suhu 25-31°C, TDS 1000 mg/L , pH 6-9) dalam kategori kelas II berdasarkan Peraturan Pemerintah No.22 Tahun 2021 tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air. Tingkat konsentrasi aktivitas Cs-137, Co-60 dan I-131 dalam air DAS Bekasi berturut-turut berkisar – 0.00642 sampai 0.00428 Bq/L, 0.00713 sampai 0.01272 Bq/L, -0.00077 sampai 0.00584 Bq/L. Secara keseluruhan hasil konsentrasi radionuklida masih berada diambang batas baku mutu (Cs-137 $1,2 \times 10^2$ Bq/L , Co-60 $1,4 \times 10^3$ Bq/L, I-131 $3,0 \times 10^5$ Bq/L) yang ditetapkan oleh Peraturan Kepala BAPETEN Nomor 7 Tahun 2013. Pola penyebaran konsentrasi aktivitas radionuklida Cs-137, Co-60, dan I-131 pada titik sampling DAS Bekasi variatif. Hal ini menunjukkan sebaran yg tidak merata karena pergerakan perairan DAS Bekasi cenderung dinamis, sehingga titik lokasi pengambilan sampel tidak berpengaruh terhadap konsentrasi aktivitas radionuklida Cs-137 di DAS Bekasi.

DAFTAR PUSTAKA

- Aryawijayanti, R., Susilo, Sutikno. 2016. Analisis Dampak Radiasi Sinar-X pada Mencit Melalui Pemetaan Dosis Radiasi di Laboratorium Fisika Medik. *Jurnal MIPA Unnes*, Vol. 38 No. 1, Hal. 25–30.
- Aziz, M., Hidayanto, E., dan Lestari, D. D. 2015. Penentuan Aktivitas ^{60}Co dan ^{137}Cs pada Sampel Unknown dengan Menggunakan Detektor Hpge. *Youngster Physics Journal*, Vol. 4 No. 2, Hal. 189–196.
- BAPETEN. 2013. Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan No 7 Tahun 2013.
- BATAN. 2013. Prosedur Analisis Sampel Radioaktivitas Lingkungan. BATAN. Jakarta.
- Brahmana, Y.S. 2017. Studi Kandungan Radionuklida Alam pada Tanaman Palawijaya di sekitar Tanah Karo Pasca Erupsi Gunung Sinabung Sumatera Utara. FMIPA Universitas Sumatera.
- Cahyati, I.D. 2021. Analisis Radionuklida Cs-137 pada Sampel Air Kanal Banjir Timur Jakarta dengan Menggunakan Spektrometer Gamma. Fakultas Sains dan Teknologi.
- Candra, H., Pujadi dan G. Wurdianto. 2010. Pengaruh Efek Geometri pada Kalibrasi Efisiensi Detektor Semikonduktor HPGe Menggunakan Spektrometer Gamma. *Prosiding Pertemuan Ilmiah XXIV HFI*, April 2010, Hal. 258–264.
- Dinas Lingkungan Hidup. 2018. Analisis Penerapan Teknologi DAM Parit sebagai Alternatif dalam Menangani Banjir dan Kekeringan pada Sub-DAS Kali Bekasi, Bekasi-Jawa Barat. 2011: 6–19.
- Djoharam, V., E. Riani, M. Yani. 2018. Analisis Kualitas Air dan Daya Tampung Beban Pencemaran Sungai Pesanggrahan di Wilayah Provinsi DKI Jakarta. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, Vol 8 No. 1, Hal.127–133. <https://doi.org/10.29244/jpsl.8.1.127-133>.
- Hanisa, E., W.D. Nugraha, A. Sarminingsih. 2017. Penentuan Status Mutu Air Sungai Berdasarkan Metode Indeks kualitas Air – National Sanitation Foundation (IKA-NSF) Sebagai Pengendalian Kualitas Lingkungan. *Jurnal Teknik Lingkungan*, Vol. 6 No. 1, Hal. 1–15.
- IAEA. 2001. Generic Models for Use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. In *Kerntechnik*, Vol. 67, No. 1. <https://doi.org/10.1515/kern-2002-0016>.
- Kurniawati, S., D.D. Lestiani, I. Kusmartini. 2011. Penentuan Aktivitas I-131 dan Co-60 di Laboratorium PTNBR. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Nuklir*, 6(2): 205–212.
- Kusuma, H., M.N. Yahya, S.Y. Wulandari. 2016. Distribusi Radionuklida ^{137}Cs di Air dan Sedimen Pulau Pari Kepulauan Seribu Jakarta. *Jurnal Keselamatan Radiasi dan Lingkungan*, Vol. 1 No. 2, Hal. 17–21.
- Luhur, N., Kadarusmanto, Subiharto. 2013. Uji Banding Sistem Spektrofotometer Gamma dengan Metoda Analisis Sumber Eu-152. *Buletin Pengelolaan Reaktor Nuklir*, Vol. X No.1, Hal. 22–30.
- Mainassy, M.C. 2017. Pengaruh Parameter Fisika dan Kimia terhadap Kehadiran Ikan Lompa (Thryssa baelama Forsskal) di Perairan Pantai Apui Kabupaten Maluku Tengah. *Jurnal Perikanan Universitas Gadjah Mada*, Vol. 19 No. 2, Hal. 61–66.
- Masykur, B. Amin, J. Jasril, S.H. Siregar. 2018. Analisis Status Mutu Air Sungai Berdasarkan Metode STORET Sebagai Pengendalian Kualitas Lingkungan (Studi Kasus: Dua Aliran Sungai di Kecamatan Tembilahan Hulu, Kabupaten Indragiri Hilir, Riau). *Dinamika Lingkungan Indonesia*, Vol. 5 No. 2, Hal. 84–96. <https://doi.org/10.31258/dli.5.2.p84-96>.
- Mukarromah, R. 2016. Analisis Sifat Fisis Kualitas Air di Mata Air Sumber Asem Dusun Kalijeruk, Desa Siwurran, Kecamatan Garung, Kabupaten Wonosobo. *Unnes Physics Journal*, Vol. 5 No. 1, Hal. 40–45.
- Murniasih, S. dan Sukirno. 2016. Uji Performa Laboratorium AAN pada Pengukuran Radionuklida dengan Aktivitas Rendah. *Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah*, 4(2): 97–102.
- Nirwana, L., R. Buchari, Wahyudi, Mujiwiyono. 2017. Pemantauan Radioaktivitas dalam Air Hujan Tahun 2016. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Pengelolaan Limbah*: 171–178.

- Noviarty dan I. Haryanti. 2016. Uji Profisiensi Laboratorium IRM Melalui Pengukuran Aktivitas Isotop Iodium-131 Menggunakan Spektrometer Gamma. Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Reaktor Nuklir, 1: 48-53.
- Noviarty, I. Haryati, S. Nisa. 2017. Analisis Radionuklida dalam Batuan Menggunakan Spektrometer Gamma. Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir - BATAN, Vol. X No. 19, Hal. 39-50.
- Palar, H. 2004. Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat. In Journal of Chemical Information and Modeling, Vol. 53, No. 9. Rineka Cipta.
- Prasetyo, K., G. Prayoga, A.R. Azhar, T. Permadi, D. Pratiwi. 2020. Kerentanan DAS Kali Bekasi Ditinjau dari Aspek Sosial-Ekonomi-Kelembagaan. Jurnal Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan (Journal of Environmental Sustainability Management), Vol. 4 No. 3, Hal. 576-591. <https://doi.org/10.36813/jplb.4.3.576-591>.
- Purwanto, A. T. dan E. Nuraeni. 2013. Optimasi Parameter Spektroskopi Gamma dengan Detektor HpGe. Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir: 307-312.
- Rafsani, F., M. Muslim, H. Suseno. 2014. Arus Permukaan yang Berpengaruh Terhadap Distribusi ¹³⁷Cs (Cesium-137) di Perairan Gresik. Jurnal Oseanografi, Vol. 3 No. 4, Hal. 115945.
- Ratnawati, E. dan J. Iman. 2015. Uji Akurasi Alat Pencacah Spektrometer Gamma dengan Menggunakan Sumber Standar. Prosiding Seminar Nasional Teknologi dan Aplikasi Reaktor Nuklir, 7(2): 107-115.
- Rosidah, F. 2009. Efektivitas Dekontaminan Ammonium Iron (III) Hexacyanoferrate (NH₄ Fe[Fe(CN)₆]) Terhadap Cesium-137 pada Monyet Ekor Panjang (*Macaca fascicularis*). UIN Jakarta.
- Sari, H.L. dan W.S. Budi. 2017. Penentuan karakteristik cacahan pada counter. Youngster Physics Journal, Vol. 6 No. 2, Hal. 151-156.
- Silalahi, C. M. dan H. Suseno. 2014. Aktivitas Cesium-137 di Perairan Bangka Selatan Sebagai Baseline Data Radionuklida di Perairan Indonesia. Jurnal Oseanografi, Vol. 3, Hal. 36-42.
- Sinaga, A., Muslim, H. Suseno. 2015. Pemodelan Distribusi Radionuklida ¹³⁷Cs di Muara Sungai Cisadane Perairan Teluk Jakarta Berdasarkan Data Radiologi dan Oseanografi. Oseanografi, Vol. 4 No. 4, Hal. 713-717.
- Suparman, I., S. Soenarjo, W.Y. Rahman. 2008. Komputasi Kalibrasi Efisiensi Control Chart dan Pengukuran Radionuklida pada Spektrometri Gamma. Risalah Lokakarya Komputasi dalam Sains dan Teknologi Nuklir: 6-7.
- Tusiro Z.K.C. 2012. Analisa Kandungan Radionuklida ¹³⁷Cs pada Sedimen di Perairan Batam. Fakultas Ilmu Kelautan dan Perikanan., 1(1): 1-7.
- Utami, N.R. 2005. Distribusi Radioaktivitas Gross dan Identifikasi Radionuklida Alam dalam Cuplikan Air, Sedimen, dan Biota di Perairan Surabaya. Teknik Lingkungan. Universitas Islam Indonesia: 1-118.
- Wahyudi, W., D. Iskandar, D. Marjanto. 2017. Pengaruh Matriks Terhadap Sistem Pencacahan Sampel Menggunakan Spektrometer Gamma. Jurnal Forum Nuklir, Vol. 1 No. 2, Hal. 65. <https://doi.org/10.17146/jfn.2007.1.2.3273>.
- Weber, W., M. Doyle-Eisele, S.K. Seikop and R. Guilmette. 2012. Biokinetics of Systemically Distributed Co-60 in The Rat: an Experimental Model Useful in Evaluating Medical Countermeasures for Internal Contamination. National Institute of Health, 103(4), 474-483. <https://doi.org/10.1097/HP.0b013e31826248d1.B IOKINETICS>.
- Wibowo, M., dan R.A. Rachman. 2020. Kajian Kualitas Perairan Laut Sekitar Muara Sungai Jelitik Kecamatan Sungailiat-Kabupaten Bangka. Jurnal Presipitasi, Vol. 17 No.1, Hal. 29-37.
- Wijono dan Rosdiani. 2006. Kalibrasi Energi dan Efisiensi Detektor HPGe Model GC1018 pada Rentang Energi 121 Sampai 1408 keV dengan Sumber Standar Eu-152 LMRI. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Fungsional Teknis Non Peneliti: 237-248.
- Windriani, R., E. Yusibani and R. Safitri. 2014. Study of Deposit Cesium-137 (¹³⁷Cs) Activity as a Result of Fission Product from the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant at Japan After Earthquake and Tsunami in 2011. Proceedings of International Conference on Natural and Environmental Science (ICONES): 05.
- Wiratama. 2019. Kondisi ¹³⁷Cs di Perairan Teluk Jakarta Serta Prediksi Persebarannya untuk Skenario Insiden Research Reactor G.A. Siwabessy pada Musim Barat. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Yulius, Y., A. Aisyah, J. Prihantono, D. Gunawan. 2018. Kajian Kualitas Perairan Untuk Budidaya Laut Di Teluk Saleh, Kabupaten Dompu. Jurnal Segara, Vol.14 No.1, Hal. 57-68. <https://doi.org/10.15578/segara.v14i1.7108>.
- Yusro, M., G.S. Wijaya, A. Muharini. 2013. Validasi Metode Penentuan Cs-137 dan K-40 dalam Sampel Lingkungan dengan Spektrometer Gamma berdasarkan ISO 17025. Teknofisika, Vol. 2 No. 1, Hal. 1-6.