

Pengukuran Kontaminasi Iodine (I-131) pada Staf yang Bekerja di Fasilitas Kedokteran Nuklir

Measurement of Iodine (I-131) Contamination in Staff Working in Nuclear Medicine Facilities

Risalatul Latifah^{1*}, Johan Andoyo Effendi Noor¹, Mohammad Robet Kamel Rizqi Ilahil Aziz¹, Hafizhudin Kafaka¹, Bunawas²

¹Departemen Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Brawijaya, Jalan veteran, Malang, Jawa Timur, Indonesia 65145

²Nuklindo-Lab Koperasi JKRL, Plaza Ciputat Mas Blok A Kav. B, Lantai 2 & 3, Jl. Ir. H. Juanda No.5A, Ciputat Timur, Tangerang Selatan, Banten, Indonesia 15412

Email: *risa.latifah@ub.ac.id; jnoor@ub.ac.id; kafakahafiz@student.ub.ac.id; moh_obet25@ub.ac.id; bunawas56@gmail.com

Abstrak – Peningkatan penggunaan radiofarmaka Iodine-131 (I-131) pada pelayanan kedokteran nuklir membawa implikasi adanya potensi radiasi interna yang diterima oleh para pekerja. I-131 memiliki volatilitas yang tinggi sehingga berpotensi menjadi kontaminan udara dan terhirup oleh staf kedokteran nuklir sebagai paparan radiasi interna. Penelitian ini bertujuan untuk mengestimasi kontaminasi I-131 pada staf di salah satu fasilitas kedokteran nuklir menggunakan spectrometer gamma. Pengukuran aktivitas I-131 di tiroid dilakukan terhadap 38 staf meliputi fisikawan medik, dokter spesialis kedokteran nuklir, radiografer, radiofarmasi, perawat, pramu husada, dan petugas kebersihan. Nilai aktivitas I-131 yang terukur di tiroid staf memiliki rentang nilai aktivitas 13,1 – 238,2 Bq pada 13 staf kedokteran nuklir. Sedangkan 25 staf kedokteran lainnya nilai aktivitas I-131 yang terukur di tiroid memiliki nilai aktivitas di bawah limit deteksi alat ($14,2 \pm 4,3$ Bq untuk laki-laki dan $11,8 \pm 3,5$ Bq untuk perempuan). Laju dosis interna tertinggi yang terukur pada tiroid staf kedokteran nuklir pramu husada dan radiofarmasi bernilai 0,1-0,5 mSv/tahun. Nilai tersebut masih di bawah nilai batas dosis untuk radiasi interna.

Kata kunci: Tiroid; Iodin-131; proteksi radiasi; kedokteran nuklir; dosis interna.

Abstract – The increasing use of the radiopharmaceutical Iodine-131 (I-131) in nuclear medicine services has implications for the potential for internal radiation received by workers. I-131 has high volatility so it has the potential to become an air contaminant and be inhaled by nuclear medicine staff as internal radiation exposure. This study aims to estimate I-131 contamination in staff at a nuclear medicine facility using a gamma spectrometer. Measurements of I-131 activity in the thyroid were carried out on 38 staff including medical physicists, nuclear medicine specialists, radiographers, radio-pharmacists, nurses, house attendants, and cleaners. The I-131 activity value measured in the staff's thyroid had an activity value range of 13.1 – 238.2 Bq in 13 nuclear medicine staff. Meanwhile, for 25 other medical staff, the I-131 activity values measured in the thyroid had activity values below the detection limit of the device (14.2 ± 4.3 Bq for men and 11.8 ± 3.5 Bq for women). The highest internal dose rate measured in the thyroid of Pramu Husada nuclear medicine staff and radiopharmaceuticals was 0.1-0.5 mSv/year. This value is still below the dose limit value for internal radiation.

Keywords: Thyroid; Iodine-131; radiation protection; nuclear medicine; internal dose.

1. Pendahuluan

United Nation Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR) melaporkan bahwa 90% jenis radiofarmaka yang paling banyak digunakan di kedokteran nuklir untuk tujuan terapi adalah Iodine-131 (I-131) [1]. I-131 terbukti efektif dalam penyembuhan kanker tiroid dan gangguan tiroid lain seperti hipertiroid. Selain keperluan terapi, I-131 juga digunakan untuk mendiagnosis fungsi hati yang tidak normal, aliran darah ginjal dan obstruksi saluran kemih [2]. Ragam pemanfaatan I-131 didasarkan pada afinitas yang tinggi pada organ tiroid serta I-131 merupakan radionuklida yang memancarkan radiasi beta dengan energi sebesar 606,31 keV dan gamma 364,489 keV [3-4]. Meningkatnya penggunaan I-131

menjadi perhatian serius dari aspek proteksi radiasi mengingat I-131 memiliki volatilitas yang tinggi yang berpotensi menjadi kontaminan udara. Bright (2000) melaporkan bahwa I-131 dalam bentuk kapsul dengan aktivitas 10 mCi mengalami penurunan nilai aktivitas di hari kedua sebesar 0,035% dan di hari berikutnya sebesar 0,012% [5]. Kontaminasi I-131 ke dalam tubuh manusia perlu menjadi perhatian dikarenakan iodin yang terdeposisi pada kelenjar tiroid menggunakan iodin dalam proses pembentukan hormon tiroid yang membantu mengatur pertumbuhan dan metabolisme, sehingga sebagian besar iodin yang masuk ke dalam tubuh akan dengan cepat mempengaruhi kinerja tiroid. Hal inilah yang menyebabkan paparan I-131 sangat memungkinkan peningkatan risiko hipotiroid, nodul tiroid, dan kanker terutama pada anak-anak [6]. Keberadaan kontaminasi I-131 di udara menjadi tantangan dalam mengembangkan metode untuk asesmen dosis interna sehingga upaya kontrol dan limitasi sebagai implentasi proteksi radiasi bisa dilakukan.

Berdasarkan ISO 16637 Tahun 2016, pemantauan paparan radionuklida dapat dilakukan dengan pengukuran di tiroid manusia. Karakteristik I-131 yang memancarkan sinar gamma dan banyak terkonsentrasi di tiroid manusia menjadikan spectrometer gamma memungkinkan untuk digunakan dalam pengukuran I-131 [7]. Detektor spectrometer gamma ditempatkan tegak lurus di depan tiroid (daerah yang banyak terkontaminasi) untuk mengetahui nilai cacahan gamma yang dikeluarkan oleh I-131 di tiroid manusia. Pemantauan paparan radiasi interna ini sudah diterapkan di berbagai negara seperti Polandia, Iran, dan Cina [8-10]. Namun, di Indonesia sendiri pemantauan paparan radiasi interna belum diterapkan. Oleh karena itu, sangat perlu dilakukan pemantauan dosis interna perorangan untuk memantau dosis berlebih yang kemungkinan diterima oleh para pekerja. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pengukuran I-131 yang terdeposit pada pekerja radiasi menggunakan spectrometer gamma untuk memberikan pengawasan dan sebagai bahan evaluasi dosis interna yang diterima pekerja sebagai upaya proteksi keselamatan pekerja.

2. Landasan Teori

Perkembangan kedokteran Indonesia cukup pesat, dibuktikan dengan adanya fasilitas kedokteran nuklir di berbagai rumah sakit di Indonesia. Salah satu fasilitas kedokteran nuklir yang diterapkan adalah penggunaan radiofarmaka I-131 untuk terapi kanker tiroid. Radiofarmaka I-131 merupakan radioisotop buatan yang memiliki waktu paruh 8,03 hari dengan emisi energi gamma 364 keV [10]. Radiofarmaka I-131 memiliki sifat volatilitas yang menyebabkan radiofarmaka I-131 mudah menguap di udara dan berpotensi terhirup oleh staf kedokteran nuklir. Secara umum, sebanyak 30% iodin dapat dikumpulkan secara langsung di tiroid manusia normal [11]. Kandungan iodin pada remaja dapat bervariasi, mulai dari 30 hingga 50 mg yang mayoritas disimpan di kelenjar tiroid [12]. Namun, jika kandungan iodin di kelenjar tiroid mengalami penurunan atau peningkatan, dapat menyebabkan kelainan (hipotiroid dan hipertiroid). Kelainan lain yang dapat terjadi pada tiroid adalah kanker tiroid yang disebabkan oleh adanya pertumbuhan sel yang abnormal.

Selama beberapa dekade terakhir, pengembangan metode dan sistem pengukuran I-131 telah dilakukan. Metode *in vitro* bioassay melalui cuplikan urin, air liur atau darah dilakukan untuk mengukur konsentrasi I-131 yang terdeposisi dalam tubuh [6]. Pemeriksaan ini direkomendasikan empat bulan sekali untuk masing-masing individu pekerja radiasi [13]. Keterbatasan laboratorium penganalisis menjadikan metode ini sulit diimplementasikan.

Spektrometer gamma portabel menjadi salah satu pilihan yang memungkinkan bisa dieksekusi di lapangan. Spektrometer gamma memiliki keunggulan mampu membedakan cacahan gamma dari I-131 dengan radionuklida yang lain [10]. I-131 terdistribusi di udara sangat berhubungan dengan nilai aktivitas spesifik dan laju paparan dari I-131 dengan asumsi I-131 terdistribusi secara homogen di udara. Asumsi ini didasarkan pada sifat I-131 saat sudah berada dalam bentuk gas di udara termasuk sebagai partikel sangat kecil (*ultrafine*) dengan diameter sekitar 0,825 nm dan bergerak sangat acak dengan koefisien difusi sebesar 0,08 cm²/detik [14]. Sebagai pemancar gamma, I-131 dapat diestimasi nilai aktivitasnya menggunakan spektrometer gamma [15-16].

3. Metoda Penelitian

3.1 Akuisisi data

Pengukuran aktivitas I-131 di tiroid dilakukan terhadap 38 staf yang bekerja di Sub Instalasi Kedokteran Nuklir di salah satu rumah sakit di Jakarta, terdiri dari 20 laki-laki dan 18 perempuan meliputi Fisikawan Medik, Dokter Spesialis Kedokteran Nuklir, Radiografer, Radiofarmasi, Perawat, Pramu Husada, dan Petugas Kebersihan. Pengukuran I-131 Pengukuran aktivitas I-131 dilakukan di tiroid staf dengan

menggunakan spektrometer gamma portabel GSB-2020 detektor NaI(Tl) 2.0". Pengukuran berlangsung selama 5 menit [8-9]. Tiroid staf diposisikan tegak lurus dengan spektrometer gamma, jarak antara tiroid dan spektrometer gamma sedekat mungkin dengan toleransi jarak terjauh adalah 10 cm [17], seperti Gambar 1. Nilai aktivitas I-131 ditentukan dengan memanfaatkan nilai efisiensi dengan Persamaan (1).

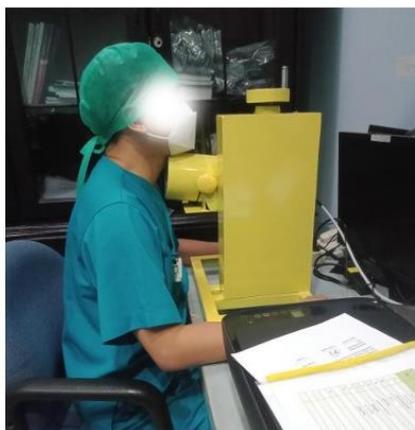
$$A = \frac{N_s - N_b}{\epsilon \cdot P_\gamma} \quad (1)$$

dengan A adalah aktivitas akhir I-131 (Bq), ϵ adalah efisiensi pengukuran spektrometer (cps/Bq), N_s adalah nilai cacahan yang terukur di tiroid (cps), dan N_b adalah nilai cacahan latar (cps), P_γ adalah limpahan yield gamma I-131 (0,812) [10].

Kalibrasi efisiensi dilakukan dengan menggunakan phantom tiroid laki-laki dan wanita. Kalibrasi dilakukan dengan cara mengukur phantom tiroid yang telah diberikan I-131 dengan jarak terdekat (1-2 cm) menggunakan spektrometer gamma [16]. Nilai aktivitas I-131 yang digunakan masing-masing *phantom* tiroid sebesar $(66,65 \pm 2,42)$ Bq untuk phantom tiroid laki-laki dan $(100,95 \pm 3,71)$ Bq untuk *phantom* tiroid perempuan. Nilai efisiensi alat digunakan untuk menentukan nilai limit deteksi alat dan nilai aktivitas I-131 di tiroid manusia. Nilai limit deteksi alat (LDA) dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan (2).

$$LDA = \frac{2,71 + 4,65\sqrt{N_b}}{(\epsilon \cdot t_b)} \quad (2)$$

dengan t_b merupakan durasi cacah latar selama 600 detik [10].



Gambar 1. Pengukuran I-131 di tiroid staf. Posisi detektor tegak lurus dengan tiroid pekerja.

3.2 Estimasi I-131

Nilai aktivitas I-131 di tiroid staf kedokteran nuklir kemudian digunakan untuk mengetahui nilai dosis interna yang diterima di tiroid staf kedokteran nuklir dengan Persamaan (3).

$$E(50) = e(50) \times I \quad (3)$$

dengan $E(50)$ adalah nilai dosis efektif yang terukur di tiroid (Sv), $e(50)$ adalah koefisien dosis $(1,1 \times 10^8 \text{ Sv/Bq})$ [17] dan I adalah paparan atau nilai aktivitas I-131 di tiroid (Bq) [7]. Kemudian dari nilai tersebut dapat ditentukan nilai dosis interna yang diterima oleh staf dengan menggunakan Persamaan (4).

$$E = E(50)/0,3 \quad (4)$$

dengan E adalah dosis efektif (mSv) dan 0,3 menunjukkan persentase I-131 yang berada di tiroid sebesar 30% dari seluruh I-131 yang masuk ke dalam tubuh secara inhalasi [18].

4. Hasil Dan Pembahasan

Nilai efisiensi alat dan limit deteksi alat spektrometer gamma yang digunakan memiliki dua nilai, seperti yang ditunjukkan oleh Tabel 1. Nilai tersebut diperoleh dari hasil kalibrasi efisiensi menggunakan dua *phantom* yang berbeda yaitu *phantom* laki-laki dan perempuan. Nilai efisiensi alat saat kalibrasi dengan

menggunakan *phantom* tiroid laki-laki lebih kecil daripada saat kalibrasi menggunakan *phantom* tiroid perempuan. Perbedaan nilai tersebut disebabkan oleh beberapa faktor, seperti volume dan luas *phantom* tiroid yang diukur, besarnya aktivitas I-131 yang dimasukkan ke dalam *phantom* tiroid, serta jarak dan ketegaklurusan antara *phantom* tiroid dan spektrometer gamma [19]. Limit deteksi yang diperoleh berbanding terbalik dengan nilai efisiensinya. Semakin besar nilai efisiensinya, maka nilai limit deteksi alat akan semakin kecil dan semakin kecil nilai efisiensinya, maka nilai limit deteksinya akan semakin besar [20].

Tabel 1. Nilai efisiensi dan limit deteksi alat.

No.	Jenis <i>Phantom</i>	Efisiensi Alat (cps/Bq)	Limit Deteksi Alat (bq)
1	Laki-laki	0,00483	14,2±4,3
2	Perempuan	0,00582	11,8±3,5

Tabel 2 menunjukkan nilai aktivitas I-131 yang terukur di tiroid staf memiliki rentang nilai aktivitas 13-238 Bq yang terukur pada 13 staf kedokteran nuklir. Sedangkan 25 staf kedokteran lainnya nilai aktivitas I-131 yang terukur di tiroid memiliki nilai aktivitas di bawah limit deteksi alat, karena nilai cacahan radiasi gamma I-131 di tiroid yang terbaca lebih kecil daripada nilai cacahan *background*. Besarnya nilai paparan I-131 disebabkan karena lamanya aktivitas di ruangan yang berpotensi terkontaminasi I-131, yaitu ruang HotLab dan ruang isolasi pasien I-131. Nilai aktivitas I-131 yang terukur di tiroid staf dipengaruhi oleh kondisi kerja dari pekerja yang berbeda-beda [8]. Pada kasus-kasus tertentu dapat mempengaruhi besarnya nilai aktivitas yang terukur di tiroid staf, seperti beban kerja pekerja terkait frekuensi pemberian obat radiofarmaka kepada pasien dan lama kerja secara kumulatif [18]. Pramur Husada dan radiofarmasi merupakan pekerja yang berpotensi lebih tinggi dibandingkan dengan pekerja lainnya. Pramur Husada bekerja lebih lama di ruangan isolasi pasien I-131, sedangkan radiofarmasi melakukan kontak langsung dengan sumber I-131 dengan dosis yang tinggi saat melakukan preparasi I-131, sehingga keduanya memiliki potensi terpapar radiasi interna I-131 lebih tinggi jika dibandingkan dengan pekerja lainnya [12]. Sebagai perbandingan, Tabel 3 menyajikan nilai aktivitas I-131 yang terukur pada masing-masing profesi.

Tabel 2. Hasil pengukuran aktivitas I-131 pada petugas radiasi di unit kedokteran nuklir.

No.	Staf di Unit Kedokteran Nuklir	Aktivitas I-131 di Tiroid (Bq)
1	Fisikawan Medik	70
2	Dokter Spesialis Kedokteran Nuklir	19-24
3	Radiografer	13-57
4	Radiofarmasi	71-118
5	Perawat	25-83
6	Pramur Husada	238
7	Petugas Kebersihan	21

Tabel 3. Perbandingan nilai aktivitas I-131 pada staf kedokteran nuklir dari penelitian lain yang relevan.

Penelitian	Staf di Unit Kedokteran Nuklir	Aktivitas I-131 di Tiroid (Bq)
Krajewska & Pachocki [8]	- Teknisi	70 – 240
	- Fisikawan, perawat, petugas proteksi radiasi	70 – 4000
	- Petugas kebersihan	70 – 1000
Liu [21]	- Radiografer	70,9 – 2630
	- Perawat	195,3 – 6070
	- Teknisi	86,9 – 446

Tabel 4 menunjukkan nilai dosis interna di tiroid staf kedokteran nuklir didapatkan dari nilai aktivitas I-131 di tiroid staf sebagai dosis *intake*. Jika diasumsikan dosis interna yang diterima staf kedokteran nuklir sama pada setiap minggu, maka dosis interna di tiroid staf kedokteran nuklir tertinggi adalah 0,5 mSv/tahun. Dosis interna di tiroid staf kedokteran nuklir tertinggi pada profesi Pramur Husada. Nilai tersebut masih di bawah nilai batas dosis interna sebesar 1 mSv/tahun [7]. Namun, nilai tersebut hanya didapatkan dari paparan interna radiofarmaka I-131 saja, belum termasuk paparan interna dari sumber lainnya. Oleh karena itu, proteksi terhadap paparan radiasi terkhususnya radiasi interna harus selalu

dilakukan dan ditingkatkan dengan melaksanakan monitoring secara rutin dan menggunakan alat proteksi khusus untuk mengurangi I-131 yang terhirup ke dalam tubuh.

Berdasarkan ISO 16637 tahun 2016, monitoring secara rutin dilakukan jika nilai aktivitas yang terukur pada staf sebesar 100 Bq. Monitoring dilakukan setiap dua minggu sekali (waktu interval 15 hari) mengacu pada fungsi retensi dan ekskresi I-131 di dalam tubuh. Selain itu, paparan radiasi interna yang difokuskan terjadi melalui jalur pernapasan (inhalasi). Proteksi yang harus diterapkan adalah penggunaan masker dan filter ruangan yang dapat menyerap I-131. Penggunaan masker dan filter ruangan yang dapat menyerap I-131 dilakukan untuk mengurangi paparan I-131 yang terhirup oleh staf. Masker dan filter ruangan yang digunakan harus dilengkapi dengan filter yang mampu menyaring molekul I-131, sehingga paparan radiasi interna I-131 secara inhalasi dapat dikurangi. Salah satu filter yang dapat digunakan adalah filter arang aktif (*active charcoal*) [22].

Tabel 4. Dosis interna yang diterima staf.

No	Staf di Unit Kedokteran Nuklir	Dosis Interna I-131 di tiroid staf (mSv/tahun)	Dosis Interna I-131 (mSv/tahun)
1	Fisikawan Medik	0,04	0,1
2	Dokter Spesialis Kedokteran Nuklir	0,011 – 0,014	0,04 – 0,05
3	Radiografer	0,003 – 0,03	0,01 – 0,1
4	Radiofarmasi	0,003 – 0,07	0,01 – 0,2
5	Perawat	0,01 – 0,05	0,05 – 0,2
6	Pramu Husada	0,1	0,5

5. Kesimpulan

Hasil pengukuran I-131 di tiroid staf kedokteran nuklir menunjukkan adanya paparan radiasi interna pada sebagian besar staf dengan nilai aktivitas yang terukur 13,1 – 238,2 Bq sebagai dosis intake. Nilai dosis interna di tiroid staf yang tertinggi, terukur pada pramu husada dengan nilai 0,14 mSv/tahun. Hal tersebut disebabkan karena intensitas kerja di dalam ruangan isolasi pasien I-131 paling lama dibandingkan staf lainnya. Namun, nilai tersebut masih di bawah nilai batas dosis tahunan, yakni 1 mSv. Walaupun demikian, upaya peningkatan proteksi radiasi harus selalu dilakukan.

Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh Hibah Doktor Dana Internal Universitas Brawijaya 2023 (Nomor kontrak 4161.9/UN10.F09/PN/2023).

Pustaka

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR. Release of patients after therapy with unsealed radionuclides. *Report to the General Assembly, with scientific annexes*. Volume I: Sources. Vienna, 2000.
- [2] Oliveira, Cassio M., Tania V. da Silva, Thessa C. Alonso, Peterson L. Squair, Calibration of CDTN-Whole Body Counter For in-vivo Measurements of I-131, *International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2009*.
- [3] Amy Kopisch, Chris B. Martin and Vesper Grantham, Exposure to Technologists from Preparing and Administering Therapeutic ^{131}I : How Frequently Should be Bioassay?, *Journal of Nuclear Medicine Technology*, volume 39 (1), 2011, pp. 60-66.
- [4] Carneiro, Luana Gomes, Eder Augusto de Lucena, Camilla da Silva Sampaio, Ana Letícia Almeida Dantas, Wanderson Oliveira Sousa, Maristela Souza Santos, Bernardo Maranhão Dantas, Internal dosimetry of nuclear medicine workers through the analysis of ^{131}I in aerosols, *Applied Radiation and Isotopes* Volume 100, June 2015, pp. 70-74.
- [5] Bright, J.M, T.T Rees, L.E Baca and R.L Green, Volatility of Radiopharmacy-prepared Sodium Iodide-131 Capsules, *Journal Nuclear Medicine and Technology*, Volume 2(1), Maret 2020, page 52-55.
- [6] International Atomic Energy Agency, IAEA. Indirect methods for assessing intakes of radionuclides causing occupational exposure. Safety Guide No18RS-G-1.2, IAEA, 2000, Safety Standard Series.

- [7] ISO 16637, Radiological protection monitoring and internal dosimetry for staff members exposed to medical radionuclides as unsealed sources, 2016.
- [8] Krajewska, G. & Pachoki, K.A, Assessment of Exposure of Workers to Ionizing Radiation from Radioiodine and Technetium in Nuclear Medicine Departmental Facilities, *Medycyna Pracy*, volume 64(5), 2013, pp. 625-630.
- [9] Heravi, G.H., Garshasbi, H., Diba, J.K., & Asghari, S.K. Monitoring of iodine-125 and iodine-131 in thyroid of individuals in nuclear medicine centers of North West provinces of Iran. *Iranian Journal of Radiation Research*, volume 2(3), 2004, pp. 141-147.
- [10] Liu, H., Bo, C., & Weihai, Z. A progress review on methods for in vivo measurement of ^{131}I in thyroids by using portable gamma spectrometers. *Radiation Medicine and Protection*, volume 2, 2022, pp.155-159.
- [11] Cember, H. and Wang, W.H, A user-friendly thyroid monitor. In *Proceedings of an International Radiation Protection Association Conference*, Hiroshima, Japan: IRPA-10, 2000.
- [12] Brudecki, K., Kowalska, A., Zagrodzki, P., Szczodry, A., Mroz, T., Janowski, P., & Mietelski, J.W, Measurement of ^{131}I activity in thyroid of nuclear medical staff and internal dose assessment in a Polish nuclear medical hospital. *Radiation and Environmental Biophysics*, volume 56(1), 2017, pp.19-26.
- [13] U.S. Nuclear Regulatory Commission. Applications of Bioassay for I-125 and I-131. Washington, D.C: U.S. Government Printing Office; 1979. Regulatory Guide 8.20.
- [14] Bunawas, Iskandar, D., Wahyudi, & Wiwik. Pengukuran ^{131}I di Udara Menggunakan Spektrometer Gamma Portabel. *Presentasi Ilmiah Keselamatan Radiasi dan Lingkungan VIII* (pp. 242- 246), 2000, Jakarta: BATAN.
- [15] Arnold, D, Fundamentals of gamma spectrometry. Bonn: BMUV, 2018.
- [16] Corebima, J.N. Pengembangan metode sederhana perkiraan dosis interna tiroid menggunakan phantom tiroid dan surveymeter beta-gamma, *Skripsi*, Universitas Brawijaya, 2022.
- [17] ICRP, Dose Coefficients for Intakes of Radionuclides by Workers, *ICRP Publication 68*, Oxford: Pergamon, 1996.
- [18] ICRP, Limits of Intakes of Radionuclides by Workers, *ICRP Publication 30*. Oxford: Pergamon Press, 1978.
- [19] Yoshitomi H, Nishino S, Tanimura Y, Takahashi M. A study of a calibration technique for a newly developed thyroid monitor and its uncertainties due to body size for radioiodine measurements. *Radiation Measurement*, volume 133, 2020.
- [20] Akira Yunoki, Uncertainty of Measurement in the Response Test of a Thyroid Monitor, *Radiation Protection Dosimetry*, 2019, pp. 1–4.
- [21] Liu, G., Ye Li, HanYu Zhang, Xue Zhang, Yin Yin Liu, Xiao Qin Wu, Li Mei Niu and Rong Zhang. Thyroid dose assessment due to inhalation of ^{131}I for nuclear medicine worker. *Frontiers in Public Health*, 2021, pp. 1-13.
- [22] Nathan Fleck, Jamey Weichert and LisaAnn Trembath, Measurement of Iodine-131 volatility during an evaporation process, *The Journal of Nuclear Medicine*, May 2008, 49 (supplement 1) 414P.