

ANALISIS TRITIUM DALAM AIR LAUT MENGGUNAKAN LSC TRICARB 2910TR MELALUI PROSES ELEKTROLISIS

Nurokhim

Pusat Teknologi Keselamatan dan Metrologi Radiasi - BATAN

Email: nurokhim@batan.go.id

ABSTRAK

ANALISIS TRITIUM DALAM AIR LAUT MENGGUNAKAN LSC TRICARB 2910TR MELALUI PROSES ELEKTROLISIS. *Base-line data* tritium dalam air laut diperlukan untuk keperluan *monitoring* lingkungan dari dampak pengoperasian instalasi nuklir, khususnya pembangkit listrik tenaga nuklir. Konsentrasi yang sangat rendah tritium dalam air laut merupakan tantangan berat dalam analisis di laboratorium dengan peralatan yang sangat terbatas. Untuk dapat mengukur tritium dalam air laut dengan LSC TRICARB 2910TR maka perlu untuk melakukan pengayaan tritium. Dalam penelitian ini dilakukan pengayaan melalui elektrolisis. Proses elektrolisis dilakukan dengan membuat 18 sel elektrolit dari erlenmeyer 100 ml yang dirangkai kombinasi seri dan paralel menyesuaikan kemampuan suplai variabel arus dan tegangan DC, maksimum 30V 30A dari HY3030E. Elektrolisis dilakukan secara bertahap sedemikian hingga 1500 ml distilat air laut dalam 18 sel terelektrolisis tinggal menjadi 50 ml, elektrolit tersisa kemudian dipreparasi untuk dapat dilakukan pencacahan di LSC 2910TR. Hasilnya cukup baik, dimana proses elektrolisis dalam penelitian ini dapat menurunkan aktivitas minimum tritium yang dapat dideteksi (MDA) dari 1,8773 Bq/L (15,76 TU) menjadi 0,1116 Bq/L (0,94 TU). Analisis 3 sampel air laut yang berasal dari Teluk Jakarta (TJ), Bangka Barat (BB) dan Selat Sunda (SS) diperoleh masing-masing konsentrasi tritiumnya sebesar $0,19098 \pm 0,01085$, $0,20313 \pm 0,01097$ dan $0,12011 \pm 0,01074$ Bq/L.

Kata kunci: tritium, air laut, LSC, elektrolisis.

ABSTRACT

ANALYSIS OF TRITIUM IN SEAWATER USING TRICARB 2910TR LSC THROUGH THE ELECTROLYTIC PROCESS. *Base-line data of tritium in sea water is necessary for the purposes of environmental monitoring from the impact of the operation of nuclear installations, especially nuclear power plants. The Very low concentrations of tritium in sea water is a serious challenge in the analysis in the laboratory with very limited equipment. To be able to measure tritium in sea water with TRICARB 2910TR LSC it is necessary to perform tritium enrichment. In this research, the enrichment process is done through electrolysis. Electrolytic process is performed by making 18 electrolytic cell made from 100 ml elenmeyer glass were assembled in series and parallel adjusted to the variable current and DC voltage power supply, capability on 30V 30A maximum from HY3030E. The Electrolytic done gradually so that the 1500 ml of sea water distillate in 18 cell living into a 50 ml, the remain electrolyte then prepared for counting that can be done in 2910TR LSC. The result is quite good, where the electrolytic process in this study can decrease the Minimum Detectable Assay (MDA) from 1.8773 Bq/L (15.76 TU) to 0.1116 Bq / L (0.94 TU). Analysing of 3 seawater samples from the Jakarta Bay (TJ), West Bangka (BB) and the Sunda Strait (SS) shown that the each tritium concentrations is 0.19098±0.01085, 0.20313±0.01097 and 0.12011±0.01074 Bq/L.*

Keywords: tritium, sea water, LSC, electrolysis.

PENDAHULUAN

Tritium (^3H atau T) merupakan radioisotop pemancar beta energi rendah, dengan energi maksimum 18,6 keV dan umur paro 12,32 tahun [1]. Secara alami tritium terjadi karena interaksi radiasi sinar kosmis dengan gas di atmosfer. Namun demikian, radioaktivitas tritium mengalami peningkatan selama masa uji coba senjata nuklir antara tahun 1945 dan 1963 yang mengindikasikan bahwa tritium merupakan radionuklida antropogenik yang dapat dibuat. Tritium dapat terbentuk di dalam bahan struktur reaktor nuklir akibat aktivasi neutron terhadap Lithium (^6Li atau ^7Li) [2] atau reaksi inti tangkapan neutron cepat oleh boron (^{10}B) [3,4]. Tritium juga terbentuk sebagai produk samping akibat pembelahan uranium maupun plutonium [5,6,7], karena itu tritium dapat terilis dari

fasilitas-fasilitas nuklir seperti pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN), fasilitas reprosesing dan limbah radioaktif. Sifat kimia dan fisika tritium mirip dengan hidrogen (^1H), pada temperatur dan tekanan udara normal tritium berbentuk gas (T_2 atau $^3\text{H}_2$), dan dapat menggantikan posisi atom hidrogen dalam air membentuk *tritiated water* T_2O . Konsentrasi aktivitas tritium dalam air dinyatakan dalam satuan Bq/L atau dalam Tritium Units (TU) dimana 1 TU sama dengan satu atom tritium per 10^{18} atom hidrogen yaitu $0,11919 \pm 0,00021$ Bq/L [8]. Tritium tercampur dan ikut menguap dalam air, sehingga dapat menyebar ke lingkungan dengan cepat, sampai ke manusia, hewan, maupun tumbuhan dengan mudah.

Baseline-data tritium dalam air laut diperlukan untuk monitoring lingkungan dari dampak pengoperasian instalasi nuklir, khususnya pembangkit listrik tenaga nuklir. Pembangkit listrik tenaga nuklir telah banyak dibangun dan dioperasikan, sebagian besar PLTN berada di pantai dengan menggunakan air laut sebagai pendingin. Di pantai sekitar samudra Pasifik, Jepang, Korea, China, Taiwan dan Amerika telah membangun dan mengoperasikan PLTN sejak beberapa dekade yang lalu, sementara di pantai samudra Hindia negara India dan Pakistan merupakan dua negara nuklir yang tidak hanya memiliki PLTN tetapi juga pernah melakukan uji coba senjata nuklir. Uji coba nuklir juga dilakukan oleh Amerika di Bikini Atoll (Pasifik) dan Inggris di kepulauan Montebello pantai timur Australia (Hindia). Indonesia sebagai negara kepulauan yang berada di antara kedua samudra tersebut sangat perlu untuk membangun kemampuan dalam mengukur dan memonitor dampak operasi PLTN.

Konsentrasi tritium yang sangat rendah dalam air laut merupakan tantangan berat dalam analisis di laboratorium dengan peralatan yang terbatas. Di laut pasifik, konsentrasi tritium berkisar antara 13 mBq/L di kutub selatan dan sampai 330 mBq/L di perairan Jepang. Di ekuator sebesar 122 mBq/L di pantai timur Australia dan 109 mBq/L di pantai timur Philipina. Di samudra Hindia berkisar antara 150 mBq/L di sekitar teluk Bengala dan teluk Arab dan sekitar 170 mBq/L di Pantai barat Australia [9,10]. Demikian juga pasca kecelakaan PLTN Fukushima akibat tsunami tahun 2011, konsentrasi tritium di air permukaan bagian Barat Laut Pasifik, 40 km dari Fukushima Jepang menunjukkan 0,05 – 0,15 Bq/L [11].

Liquid Scintillation Counting (LSC) TRICARB 2910TR merupakan alat cacah radiasi yang dapat digunakan untuk menentukan aktivitas radionuklida pemancar beta seperti tritium dalam sampel cair [12]. Pengukuran konsentrasi tritium dalam air laut menggunakan LSC dapat dilakukan dengan preparasi sederhana, langsung mencampur air sampel dengan sintilator cocktail yang sesuai atau preparasi dengan destilasi untuk menghilangkan pengotor dalam sampel. Akan tetapi untuk konsentrasi tritium yang sangat rendah, preparasi khusus diperlukan untuk memperkaya kandungan tritium dalam sampel. Penelitian ini merupakan awal kegiatan yang bertujuan untuk menentukan konsentrasi tritium dalam air laut berdasarkan peralatan yang tersedia di laboratorium Radioekologi Kelautan Serpong. Studi awal terhadap performa LSC 2910TR menunjukkan bahwa konsentrasi tritium minimum yang dapat diukur adalah 2,05 Bq/L dengan limit deteksi 0,26 cpm [13], karena itu konsentrasi tritium dalam air laut yang umumnya $< 0,33$ Bq/L perlu diperkaya agar mencapai batas minimum deteksi. Proses pengayaan dilakukan dengan membuat dan mengoperasikan perangkat sel elektrolisis di laboratorium.

TATA KERJA

Alat dan Bahan:

Sampel air laut yang telah tersedia di laboratorium dipreparasi awal dengan menambahkan bahan kimia NaOH dan KMnO_4 . Pemurnian air laut dari pengotor menggunakan distilator GRAHAM CONDENSOR, tabung gelas dengan pipa spiral didalamnya, dilengkapi dengan pipa plastik untuk aliran air pendingin, dan pemanas SUPER NUOVA dari *Thermo Scientific*, dirangkai seperti Gambar 1.



Gambar 1. Rangkaian alat Distilator

Sebanyak 18 sel elektrolisis dibuat dan dirangkai secara seri dan paralel untuk proses elektrolisis, memperkaya tritium dalam sampel. Tiap sel terdiri dari satu gelas erlenmeyer 100 ml, dua buah elektroda *stainless steel*, karet penyumbat dan pipa plastik penghambat penguapan. Sebanyak 6 sel ditempatkan dalam satu *box* plastik disusun dalam dua seri masing-masing terdiri 3 sel seperti Gambar 2(a). Es kering (*dry ice*) sebagai pendingin ditempatkan di antara dua rangkaian seri seperti gambar 2(b). Tiga buah *box* berisi 18 sel elektrolit dielektrolisis dengan suplai tegangan arus searah HY3030E seperti gambar 2(c).



(a) 6 sel elektrolit dalam *box* (b) pendingin Es kering (c) proses elektrolisis

Gambar 2. Rangkaian sel elektrolit dengan suplai tegangan DC HY3030E

Cocktail standar Ultima Gold™ produksi Parkin Elmer digunakan sebagai bahan *scintillation*, dicampur dengan sampel yang akan dianalisis di dalam *vial* (botol kecil) gelas 20 ml. Botol-botol gelas *vial* standar, blangko dan sampel disiapkan dan disusun dalam rak sampel, selanjutnya dicacah menggunakan pencacah LSC TRICARB 2910TR (Gambar 3).



Gambar 3. *Vial* standar dan sampel dalam rak, serta pencacah LSC TRICARB 2910TR.

Prosedur kerja

Kedalam 1800 ml air laut dalam 2 x 1 liter gelas beaker ditambahkan 6 g NaOH dan 0,6 g KMnO_4 , dicampur sampai homogen agar zat-zat pengotor organik dan anorganik terikat dan mengendap. Larutan kemudian didistilasi hingga mendapatkan 1500 ml distilat. Dalam 1500 ml

distilat ditambahkan 5 gr NaOH kemudian diaduk dan didistribusikan dalam 18 sel elektrolit. Kedelapanbelas sel kemudian dipasang dan di rangkai dalam 3 box plastik sebagaimana Gambar 2.

Proses elektrolisis dilakukan dengan mengalirkan 0,25 – 0,5 A arus listrik pada tiap sel, dan terus menjaga agar arus total dalam rangkaian yang ditampilkan pada *display* HY3030E sebesar 5 - 9 A, dengan cara mengatur/mengontrol variabel tegangan . Temperatur dijaga agar tetap di bawah temperatur ruangan dengan menempatkan peralatan dalam ruang ber AC dan menempatkan es kering diantara sel elektrolit. Proses dijaga untuk beroperasi kontinyu selama lima hari jam kerja dan dimatikan pada hari libur. Ketika volume elektrolit tiap sel berkurang menjadi sekitar 20 ml, rangkaian di bongkar kemudian seluruh isi sel digabung dan didistribusikan kembali dalam 6 sel, selanjutnya elektrolisis dilanjutkan terhadap enam sel (1 box). Pembongkaran kembali dilakukan saat elektrolit dalam 6 sel masing-masing tersisa sekitar 20 ml, seluruh isi sel digabung dan didistribusi dalam 3 sel yang selanjutnya dielektrolisis secara seri, sehingga akhirnya diperoleh elektrolit akhir sebanyak 50 ml dari ketiga sel.

Hasil akhir elektrolisis berupa 50 ml elektrolit kemudian didistilasi, menghasilkan 20-30 ml distilat, 5-10 ml fraksi awal dan akhir distilat dibuang, sehinga menyisakan sekitar 15 ml distilat kaya dengan tritium yang siap untuk preparasi pencacahan.

Sebanyak 5 ml distilat akhir dicampur dengan 15 ml *cocktail* Ultima Gold™ dalam *vial* gelas, dikocok kurang lebih 10 menit agar homogen kemudian didiamkan sekitar 8 jam dalam ruang gelap. *Vial* sampel kemudian diletakkan dalam rak sampel (*tray*) bersama *vial* blangko berisi campuran 5 ml distilat air mineral dan 15 ml Ultima Gold™ yang telah dibuat sebelumnya untuk menentukan *background* pencacahan. Selanjutnya sampel dan blangko dicacah dalam LSC 2910TR, masing-masing dicacah 3x selama 1000 menit.

Analisis hasil pengukuran dimulai dengan menentukan nilai *Minimum Detectable Activity* (MDA), batas pendeteksian (L_D), dan level kritis pengukuran (L_C) menggunakan cacah blangko dengan formulasi CURIE [13,14,15]:

$$MDA \text{ (Bq/L)} = \frac{2,71+4,65 \sqrt{Cpm_{bk} \cdot t_{bk}}}{\varepsilon \cdot V \cdot 60 \cdot t_{bk}} \quad (1)$$

$$L_D \text{ (cpm)} = \frac{2,71+4,65 \sqrt{Cpm_b \cdot t_{bk}}}{t_{bk}} \quad (2)$$

$$L_C \text{ (cpm)} = 1,64 \sqrt{\frac{2Cpm_{bk}}{t_{bk}}} \quad (3)$$

dengan Cpm_{bk} adalah laju cacah blangko (cpm), t_{bk} lama pencacahan (menit), ε efisiensi , dan V volume blangko dalam *vial* (liter). Efisiensi ditentukan berdasarkan nilai *transformed Index of the External Standard* (tSIE) tiap pencacahan pada kurva kalibrasi Efisiensi vs tSIE yang dapat dibuat dari data-data yang telah tersedia dalam perangkat lunak QuantaSmart™. [16]

Kriteria penerimaan, apakah sampel dinyatakan aktif mengandung tritium atau dinyatakan tidak terdeteksi karena dibawah batas kemampuan peralatan ditentukan dari laju cacah sampel dikoreksi dengan laju cacah blangko dihitung dengan:

$$CR_S = Cpm_S - Cpm_{bk} \quad (4)$$

Dimana Cpm_S adalah laju cacah sampel (cpm) dan CR_S laju cacah sampel terkoreksi *background*. Apabila nilai CR_S berada dibawah L_D maka konsentrasi tritium akan lebih rendah dari MDA, dan validitas hasil akan mulai meragukan, namun angka ini masih dapat diterima jika masih berada diatas nilai batas kritis L_C dengan kesalahan pengukuran 5%.

Konsentrasi atau aktivitas tritium dalam sampel yang telah diperkaya dapat dihitung dengan persamaan berikut [17]:

$$A \text{ (Bq/L)} = \frac{Cpm_S - Cpm_{bk}}{60 \cdot \varepsilon \cdot V \cdot R_d} e^{\lambda t} \quad (5)$$

Dimana Cpm_S adalah laju cacah yang dianalisis, R_d *Yield* proses distilasi, dan $e^{\lambda t}$ faktor koreksi peluruhan tritium.

Konsentrasi tritium dalam air laut dihitung dengan persamaan [18,19]:

$$A \text{ (Bq/L)} = \frac{(Cpm_S - Cpm_{bk})}{60 \cdot \epsilon \cdot V \cdot R_d} e^{\lambda t} \frac{1}{(Vsbe/Vsf)^f} \quad (6)$$

dimana Vsbe dan Vsf adalah volume air laut sebelum dan sesudah proses pengayaan/elektrolisis, sedangkan f adalah faktor pengayaan.

Dengan melalui proses pengayaan ini maka MDA pengukuran menjadi lebih rendah dan dapat dihitung dengan:

$$MDA \text{ (Bq/L)} = \frac{2.71 + 4.65 \sqrt{Cpm_{bk} \cdot t_{bk}}}{\epsilon \cdot V \cdot 60 \cdot t_{bk}} \frac{1}{(Vsbe/Vsf)^f} \quad (7)$$

Ketidakpastian (*uncertainty*) karena pengukuran (pencacahan) dengan tingkat kepercayaan 95% dihitung dengan persamaan :

$$\sigma \text{ (Bq/L)} = \frac{2}{60 \cdot \epsilon \cdot V \cdot R_d} \cdot \sqrt{\frac{Cpms}{ts} + \frac{Cpmbk}{tbk}} \quad (8)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1 memperlihatkan data hasil pencacahan blangko dan sampel air laut dari Teluk Jakarta (TJ), Bangka Barat (BB) dan sampel Baruna Jaya yang di ambil dari Selat Sunda (SS). Sampel-sampel ini digunakan karena sudah tersedia di laboratorium. Air laut dari teluk Jakarta tersedia rutin karena banyak digunakan untuk penelitian bioakumulasi radioekologi kelautan, air laut dari Bangka Barat merupakan air sampling tahun 2013, sedangkan sampel SS merupakan air laut dari ekspedisi Kapal Riset Baruna Jaya tahun 2010. Sampel air laut dari berbagai lokasi sudah banyak tersedia di laboratorium, namun karena keterbatasan kemampuan peralatan dan bahan untuk analisis baru tiga sampel tersebut dapat dianalisis selama tahun 2013.

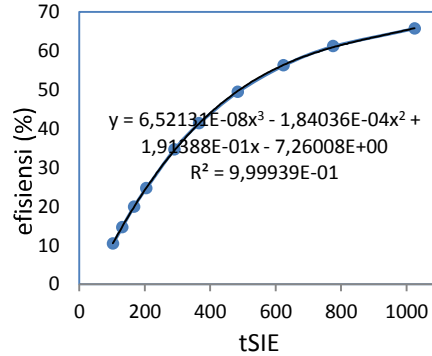
Tabel 1. Data cacah pengukuran blanko dan sampel

Sampel	Pencacahan 3x 1000 menit (cpm)			Cacah rata-rata (cpm)		
	y1	y2	y3	\bar{y}	\pm	2σ
Blangko	2,7389	2,8139	2,8196	2,7908	\pm	0,0610
TJ	3,1507	3,1819	3,1642	3,1656	\pm	0,0650
BB	3,1701	3,2021	3,1906	3,1876	\pm	0,0652
SS	2,9737	3,0050	3,0021	2,9936	\pm	0,0632

Dari data tabel diatas dan menggunakan persamaan (1), (2) dan (3) maka MDA, L_D dan L_C LSC-2910TR dalam pengukuran ini adalah sebesar 1,8773 Bq/L, 0,2484 cpm dan 0,1225 cpm. Selisih cacah sampel terhadap blangko CR_{TJ} , CR_{BB} dan CR_{SS} adalah 0,375, 0,397 dan 0,203. CR_{TJ} dan $CR_{BB} > L_D$ sehingga sampel-sampel yang telah diperkaya tersebut mempunyai Aktivitas $> MDA$. Sedangkan $CR_{SS} < L_D$ karena itu akan mempunyai aktivitas dibawah nilai MDA, namun karena masih lebih besar dari nilai kritis L_C maka nilai aktivitas hasil pengukuran masih dapat diterima.

Konsentrasi atau aktivitas tritium dalam sampel yang telah diperkaya dihitung dengan persamaan (5) sedangkan konsentrasi tritium dalam air laut menggunakan persamaan (6). Volume ketiga sampel dalam vial adalah 5×10^{-3} liter, tSIE rata-rata dari tiga kali pengukuran untuk masing-masing sampel adalah 396,98, 402,55 dan 399,75. Dengan menggunakan grafik standar seperti yang ditampilkan pada Gambar 4 diperoleh efisiensi pengukuran sebesar 43,8, 44,2 dan 44 % untuk sampel TJ, BB dan SS. Koreksi peluruhan ($e^{\lambda t}$) dihitung dengan jarak waktu sampling dan pengukuran selama 3 dan 6 bulan untuk sampel TJ dan BB sedangkan sampel SS selama 3 tahun, dengan waktu paro tritium 12,32 tahun maka koreksi peluruhan sampel TJ, BB dan SS berturut-turut

adalah 1,014, 1,028 dan 1,184. Karena belum dilakukan penelitian tersendiri, *Yield* proses destilasi (Rd) atau *recovery* tritium dianggap 90% mengacu penelitian FORKOPIC dkk.[20]. Demikian juga faktor pengayaan (f) dianggap sebesar 83% mengacu pada hasil penelitian WOLFANGO PLASTINO dkk.[21]. Tabel 2 memperlihatkan nilai-nilai parameter yang digunakan dalam perhitungan ini.



Gambar 4. Kurva standar efisiensi tritium.

Tabel 2. Nilai parameter perhitungan konsentrasi tritium

Sampel	CRs	tSIE	ϵ	$e^{\lambda t}$	V (liter)
TJ	0,375	396,98	0,438	1,014	0,005
BB	0,397	402,55	0,442	1,028	0,005
SS	0,203	399,75	0,440	1,184	0,005

Tabel 3 memperlihatkan aktivitas tritium dalam sampel diperkaya dan konsentrasi tritium dalam air laut. Secara keseluruhan hasil tersebut cukup baik dan metode/prosedur ini dapat digunakan untuk pengukuran tritium dalam air laut. Untuk wilayah laut Indonesia yang jauh dari fasilitas nuklir hasil pengukuran tersebut masih sebanding dengan pengukuran yang telah banyak dilakukan para peneliti lain. WATANABE dan kawan-kawan mempresentasikan bahwa konsentrasi tritium di permukaan laut Jepang pada kedalaman 0 - 200 m sebesar 3.6 TU [22] atau sekitar 430 mBq/L, sedangkan Shigeki SHIMA dan kawan-kawan dalam penelitiannya di laut sekitar fasilitas reprocessing bahan bakar bekas yang baru dibangun di Rokkasho mendapatkan tritium bervariasi antara 130 – 160 mBq/L atau setara dengan 1 – 1,34 TU [23].

Tabel 3. Aktivitas tritium dalam sampel diperkaya dan dalam air laut

Sampe l	Tritium dalam sampel diperkaya (Bq/L)	Tritium dalam air laut (Bq/L)
TJ	2,89229 ± 0,18254	0,19098 ± 0,01085
BB	3,07625 ± 0,18445	0,20313 ± 0,01097
SS	1,81905 ± 0,18071	0,12011 ± 0,01074

Dengan menggunakan reduksi volume 30 kali dan faktor pengayaan 0,83 maka dengan persamaan (7) MDA pengukuran turun dari 1,8773 Bq/L (15,7633 TU) menjadi 0,1116 Bq/L (0,9368 TU). Angka ini menunjukkan bahwa metode dengan pengayaan ini dapat diterapkan untuk analisis tritium dalam air laut. Namun demikian lama proses elektrolisis menjadi hambatan dalam pelaksanaan analisis ini. Secara teoritis untuk melakukan elektrolisis 1450 ml destilat air laut akan di perlukan suplai arus sebesar 4645 Ah (PALOMO dkk.). Karena itu dengan perkiraan arus listrik total sebesar 9A maka elektrolisis akan selesai dalam waktu 516 jam atau 21 hari, kurang lebih 1 bulan jam kerja. Selama proses berlangsung daya hantar elektrolit-elektrolit dalam sel terus berubah, arus dan tegangan perlu dikontrol dan disesuaikan secara manual. Demikian juga dengan pendingin *dry ice* perlu dikontrol dan diganti secara rutin. Proses yang tidak sepenuhnya kontinyu, pembongkaran sel serta elektroda yang aus teroksidasi juga membuat proses berjalan lambat. Karena itu masih

banyak yang perlu diperbaiki dan diteliti agar metode pengukuran ini dapat digunakan lebih efektif untuk analisis sampel yang jumlahnya cukup banyak.

KESIMPULAN

Dengan melalui proses elektrolisis untuk proses pengayaan, LSC TRICARB 2910TR dapat digunakan untuk menentukan konsentrasi tritium yang sangat rendah di dalam air laut. Pengurangan volume 30 kali dengan faktor pengayaan 83% menurunkan MDA pengukuran dari 1,8773 Bq/L (15,7633 TU) menjadi 0,1116 Bq/L (0,9368 TU).

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa konsentrasi tritium dalam sampel air laut TJ, BB dan SS adalah $0,19098 \pm 0,01085$, $0,20313 \pm 0,01097$ dan $0,12011 \pm 0,01074$. Sebanding dengan hasil pengukuran beberapa peneliti lain.

Perlu diteliti lebih lanjut untuk optimasi proses pengayaan/elektrolisis agar metode pengukuran ini dapat diterapkan secara lebih efektif.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. UNTERWEGER, M.P., LUCAS, L.L. Calibration of the National Institute of Standards and Technology treated-water standard, *App. Radiat. Isot* 52, (2000).
- [2]. ZERRIFFI, HISHAM, [Tritium: The environmental, health, budgetary, and strategic effects of the Department of Energy's decision to produce tritium](#). *Institute for Energy and Environmental Research*, (2010).
- [3]. JONES, GREG, [Tritium Issues in Commercial Pressurized Water Reactors](#), *Fusion Science and Technology* 54 (2): 329–332, (2008).
- [4]. SUBLETTE, CAREY (17 May 2006). [Nuclear Weapons FAQ Section 12.0 Useful Tables](#). *Nuclear Weapons Archive*, (2010).
- [5]. ANL, [Tritium \(Hydrogen-3\) – Human Health Fact sheet](#), *Argonne National Laboratory*, August (2005).
- [6]. SEROT, O.; WAGEMANS, C.; HEYSE, J. (2005). New Results on Helium and Tritium Gas Production from Ternary Fission, *International conference on nuclear data for science and technology, AIP Conference Proceedings* 769: 857–860, (2005).
- [7]. PUJOL, L.L., SANCHEZ-CABEZA, J.A. Optimization of liquid scintillation counting conditions for rapid tritium determination in aqueous sample, *J. Radional. Nucl. Chem.* 242(2), (1999).
- [8]. GÖNING, M., ROZANSKY, K. Uncertainty assessment of environmental tritium measurements in water, *Practitioner's report Accreditation Quality Assurance* 8, (2003).
- [9]. IAEA. Worldwide marine radioactivity studies (WOMARS), Radionuclide levels in oceans and seas. *IAEA Tecdoc-1429*, (2005).
- [10]. POVINEC P.P. et.al., Tritium, Radiocarbon, ^{90}Sr and ^{129}I in the Pacific and Indian Ocean, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Elsevier*, (2010).
- [11]. POVINEC P.P. et.al., Cesium, iodine and tritium in NW Pacific waters – a comparison of the Fukushima impact with global fallout, *Biogeoscience, Vol 10*, (2013).
- [12]. PACKARD, *LSC Handbook of Environmental Liquid Scintillation Spectrometry*, Packard Instrument Company, (1995).
- [13]. NUROKHIM, Unjuk kerja LSC TRICARB 2910TR pada pengukuran radioaktivitas tritium dalam sampel air laut, *Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah*, Volume 16, (2013).
- [14]. CURIE L.L., Limits for qualitative detection and quantitative determination, Application to radiochemistry. *Anal. Chem.* 40, 586–593, (1968).
- [15]. VILLA, M. and MANJON, G., Low-level measurement of tritium in water, *Applied Radiation and Isotopes* 61, (2004).
- [16]. THOMSON J., Use and Preparation of Quench Curves in Liquid Scintillation Counting, *Packard BioScience*, (2001).
- [17]. PALOMO, M. et.al., Tritium activity levels in environmental water samples from different origins, *Applied Radiation and Isotopes* 65, (2007).
- [18]. NIKOLOV, J. et.al., Different methods for tritium determination in surface water by LSC, *Applied Radiation and Isotopes* 71, (2013).
- [19]. MADRUGA et.al., Determination of tritium in Waters by Liquid Scintillation Counting, *Advances in Liquid Scintillation Spectrometry*, (2008).

- [20]. FORKOPIC,S. et.al., Tritium Determination in Danube River Water in Serbia by Liquid Scintillation Counter, *World Academy of Science, Engineering and Technology* 52, (2011).
- [21]. PLASTINO,W. et.al., Tritium water electrolytic enrichment and liquid scintillation counting, *Radiation Measurement* 42, (2007).
- [22]. WATANABE, Y.W., WATANABE, S., TSUNOGAI, S., Tritium in the Japan Sea and the renewal time of the Japan Sea deep water, *Marine Chemistry Volume 34, Issues1-2*, (1991).
- [23]. SHIMA, S. et.al., Distribution of anthropogenic radionuclides in the water column of Rokkasho, Japan, *Radioactivity in the Environment, Volume 8*, (2006).