

KANDUNGAN ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po DAN ^{40}K PADA TEMBAKAU DARI BEBERAPA MERK ROKOK YANG DIPASARKAN DI BANDUNG JAWA BARAT

Putu Sukmabuana

Pusat Sains dan Teknologi Nuklir – BATAN
Jl. Tamansari No.71, Bandung, 40132
Email: sukma23@batan.go.id

Diterima: 25-05-2016

Diterima dalam bentuk revisi: 08-08-2016

Disetujui: 22-08-2016

ABSTRAK

KANDUNGAN ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po DAN ^{40}K PADA TEMBAKAU DARI BEBERAPA MERK ROKOK YANG DIPASARKAN DI BANDUNG, JAWA BARAT. Pada penelitian ini telah dilakukan pengukuran kandungan radionuklida alam ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po dan ^{40}K didalam tembakau rokok, untuk memperkirakan dosis efektif yang diterima oleh perokok. Sampel tembakau meliputi 14 merek rokok yang umum dijual dan dikonsumsi di Indonesia. Setelah tembakau dikeringkan dan dihaluskan, konsentrasi ^{226}Ra , ^{210}Pb dan ^{40}K dicacah menggunakan spektrometri sinar γ , selama 80.000 detik. Didapat rata-rata konsentrasi ^{226}Ra = $4,18 \pm 0,67$ Bq/kg, untuk ^{210}Pb = $4,71 \pm 0,82$ Bq/kg, sedangkan rata-rata konsentrasi ^{40}K = $26,50 \pm 2,08$ Bq/kg. ^{210}Po dihitung berdasarkan kesetimbangan radioaktif, hasilnya $4,09 \pm 0,71$ Bq/kg. Dengan menggunakan koefisien dosis efektif yang diberikan oleh ICRP, dapat dilakukan estimasi dosis efektif tahunan yang diterima oleh perokok. Rata-rata dosis efektif tahunan untuk ^{226}Ra adalah $80,46 \pm 12,93$ $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$, untuk ^{210}Pb = $28,47 \pm 4,96$ $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$, dan ^{210}Po = $74,31 \pm 12,96$ $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$. Estimasi dosis efektif radionuklida ^{40}K tidak dapat dilakukan karena koefisien dosis untuk ^{40}K tidak tersedia di ICRP 71. Dengan menjumlahkan dosis rata-rata dari ^{226}Ra , ^{210}Pb dan ^{210}Po , didapat total estimasi dosis efektif rata-rata pertahun $183,24$ $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$ atau sekitar 14,5% dari batas dosis paparan radiasi secara inhalasi di dunia (1260 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$). Dosis efektif diatas masih relatif kecil, namun demikian bila zat radioaktif dan bahan kimia dalam asap rokok memasuki aliran darah maka akan dapat mempengaruhi tubuh secara keseluruhan. Inilah sebabnya mengapa merokok menyebabkan begitu banyak penyakit, termasuk kanker, penyakit jantung dan berbagai penyakit paru-paru.

Kata kunci: Radioaktivitas, tembakau, dosis efektif, merokok.

ABSTRACT

THE CONTENT OF ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po AND ^{40}K ON TOBACCO OF SOME CIGARETTE BRANDS WERE SOLD IN BANDUNG, WEST JAVA. This study on the measurements of ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po and ^{40}K natural radionuclides contained in tobacco smoke, in order to estimate the effective dose received by smoker has been carried out. The samples have been measured covering 14 brands of cigarettes are commonly sold and consumed in Indonesia. After the tobacco is dried and mashed, the concentration of ^{226}Ra , ^{210}Pb and ^{40}K counted using γ -ray spectrometry, for 80,000 seconds. It was obtained that the average concentration of ^{226}Ra was 4.18 ± 0.67 Bq/kg, for ^{210}Pb was 4.71 ± 0.82 Bq/kg, while the average concentration of ^{40}K was 26.50 ± 2.08 Bq/kg. ^{210}Po calculated based on radioactive equilibrium, the result was 4.09 ± 0.71 Bq/kg. By using a dose coefficients given by ICRP, the estimated annual effective dose received by the smoker was calculated. The average annual effective dose for ^{226}Ra was 80.46 ± 12.93 $\mu\text{Sv}/\text{year}$, for ^{210}Pb was 28.47 ± 4.96 $\mu\text{Sv}/\text{year}$, and ^{210}Po was 74.31 ± 12.96 $\mu\text{Sv}/\text{year}$. Estimated effective dose for ^{40}K radionuclide can not be done because the dose coefficients for ^{40}K is not available in ICRP 71. By summing the average dose of ^{226}Ra , ^{210}Pb and ^{210}Po , obtained total effective dose estimated annual average was 183.24 $\mu\text{Sv}/\text{year}$ or around 14,5% of the dose limit for radiation exposure by inhalation in the world (1260 $\mu\text{Sv}/\text{year}$). In summary the effective dose above is still relatively small, but nevertheless when radioactive substances and chemicals in cigarette smoke enters the bloodstream it can affect the entire body. This is

why smoking causes so many diseases, including cancer, heart disease and various lung diseases.

Keywords: Radioactivity, tobacco, effective dose, smoking.

1. PENDAHULUAN

Asap rokok merupakan campuran kompleks yang terdiri dari lebih 100 zat karsinogen [1,2], dan *Tar* merupakan karsinogen yang utama, selain itu ada karbon monoksida, nikotin dan zat-zat lainnya yang umum ada di dalam asap rokok. Ketika seorang menghisap asap rokok, maka serta merta zat-zat beracun dan radioaktif yang terkandung dalam asap tersebut akan masuk ke dalam sistem pernafasan dan juga tertelan bersama air liur masuk ke sistem pencernaan. Masuknya zat-zat karsinogen ke dalam tubuh dapat secara langsung menyebabkan kerusakan pada sel dan jaringan paru-paru, saluran pencernaan dan usus. Jadi merokok dapat meningkatkan resiko timbulnya beberapa penyakit, misalnya kanker paru-paru, bronkitis kronis, gangguan di dalam usus, lambung dan lain-lainnya. Pengaruh dari zat-zat kimia dari asap rokok pada sistem pernapasan dan pencernaan manusia telah banyak dipelajari dan diteliti [3]. Selain mengandung zat-zat kimia, tembakau juga mengandung zat-zat radioaktif alam atau *Natural Occuring Radiactive Material (NORM)*, misalnya ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po dan ^{40}K [4,5,6].

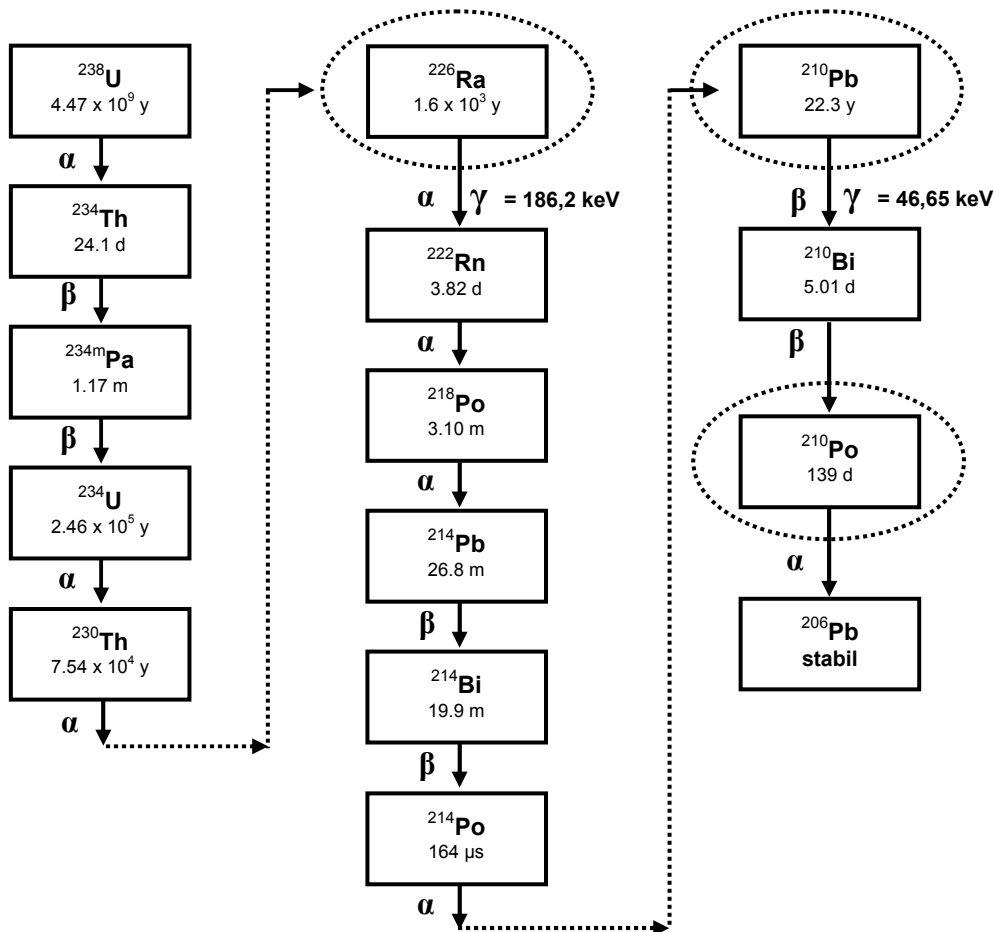
Bahaya merokok secara umum telah diketahui dengan baik, pada beberapa dekade belakangan ini. Namun, hanya beberapa orang yang mengetahui bahwa tembakau juga mengandung bahan

radioaktif, seperti: ^{226}Ra , ^{210}Po dan ^{210}Pb . Ketiga radionuklida tersebut sama-sama beracun dan merupakan zat radioaktif yang sangat berbahaya bagi perokok dan juga merugikan orang lain yang terkena asap rokok. ^{226}Ra , ^{210}Po dan ^{210}Pb dapat ditemukan secara alami dalam tanah, air maupun udara. Selain itu juga dapat ditemukan didalam pupuk yang berkadar fosfat tinggi, seperti yang biasa digunakan petani tembakau untuk memupuk tanamannya. Bila ketiganya terserap masuk kedalam tanaman tembakau maka akan tetap terakumulasi didalam daun tembakau walaupun telah diproses dan dikeringkan [7].

^{226}Ra , ^{210}Pb dan ^{210}Po adalah zat radiokatif alam yang dihasilkan oleh peluruhan deret ^{238}U . ^{226}Ra adalah pemancar sinar γ dengan energi 186,2 keV (intensitas 3,64 %) sedangkan ^{210}Pb pemancar sinar γ dengan energi 46,5 keV (intensitas 4,25 %), untuk ^{210}Po hanya memancarkan partikel α . Ketiganya sangat penting untuk diperhatikan, karena ^{226}Ra disamping memancarkan sinar γ juga memancarkan partikel α dengan waktu paruh yang sangat panjang sekitar $1,6 \times 10^3$ tahun, sedangkan ^{210}Pb adalah pemancar sinar γ dan β dengan waktu paruh 22,3 tahun. ^{210}Pb meluruh menjadi ^{210}Bi ($t_{1/2}=5.01$ hari, 100 % pemancar β) meluruh lagi menjadi ^{210}Po ($t_{1/2}=139$ hari, 100 % pemancar α). ^{210}Pb dan ^{210}Po mempunyai waktu paruh relatif panjang sehingga cukup

signifikan memberikan dosis radiasi kepada manusia, selain itu keduanya juga bersifat racun [8,9]. Sedangkan ^{210}Bi tidak terlalu signifikan karena umurnya relatif pendek hanya sekitar 5 hari dan merupakan pemancar β . Oleh karena itu estimasi dosis efektif karena menghirup ^{226}Ra , ^{210}Po dan ^{210}Pb yang terkandung dalam asap rokok telah banyak dipelajari dan menjadi perhatian penting di banyak negara [10,11,12]. Walaupun keberadaan ^{226}Ra , ^{210}Pb dan ^{210}Po selalu bersama-sama

mengikuti hukum kesetimbangan sekuler, namun pada penelitian ini tidak dilakukan pengukuran konsentrasi ^{210}Po karena hanya memancarkan partikel α saja dan tidak memancarkan sinar γ , sedangkan peralatan yang tersedia hanya spektrometer γ . Untuk menentukan konsentrasi ^{210}Po dapat dihitung dengan mengikuti kesetimbangan peluruhan antara ^{210}Po sebagai anak luruh dari ^{210}Pb sebagai induknya [7,13].



Gambar 1. Deret peluruhan Uranium-238 [14].

Kalium merupakan unsur logam alkali yang berwarna putih keperakan dan merupakan mineral batuan dalam bentuk senyawa karbonat. Terdapat tiga isotop utama kalium yaitu ^{39}K (93,3 %), ^{40}K (0,012 %), dan ^{41}K (6,7 %). Isotop ^{39}K dan ^{41}K adalah stabil, sedangkan ^{40}K bersifat radioaktif yang meluruh menjadi ^{40}Ca dan ^{40}Ar disertai pemancaran partikel beta dan sinar gamma dengan energi 1460,8 keV.

Menurut hasil penelitian oleh *Constantin Papastefanou* dari Aristotle University of Thessaloniki, Yunani pada tahun 2009, telah diketahui bahwa sebagian besar ^{210}Pb masuk ke dalam tanaman tembakau melalui jalur udara dan terserap ke dalam daun tembakau melalui *trikoma* (bulu daun atau rambut daun yang berlendir), dan sebagian kecil diserap akar dari tanah [13]. Sedangkan ^{226}Ra dan ^{40}K masuk ke dalam tanaman tembakau dari hasil penyerapan kalium yang terkandung dalam tanah atau kalium yang terkandung dalam pupuk penyubur tanaman tembakau

Menurut uraian diatas data kandungan radionuklida alam di dalam tembakau menjadi hal penting dan sangat dibutuhkan dalam perhitungan potensi bahaya radiasi yang timbul. Pengukuran konsentrasi radionuklida alam dalam tembakau dapat dilakukan dengan beberapa metode, salah satunya adalah menggunakan spektrometri sinar γ . Pada pengukuran dengan metode spektrometri sinar γ relatif lebih sederhana karena tidak membutuhkan preparasi sampel seperti radionuklida pemancar α atau β [7]. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai

bahan rekomendasi kepada perokok aktif agar lebih bijaksana dalam merokok karena disamping membahayakan dirinya sendiri juga dapat membahayakan bagi orang lain yang berada di sekitarnya.

2. TATA KERJA

Penentuan konsentrasi ^{226}Ra , ^{210}Pb dan ^{40}K didalam tembakau rokok dilakukan melalui tiga tahapan yaitu pertama sampling tembakau, kedua pencacahan dengan spektrometer sinar gamma, dan ketiga perhitungan konsentrasi. Konsentrasi ^{210}Po dihitung berdasarkan kesetimbangan peluruhan radiasi antara ^{210}Po sebagai anak luruhnya dan ^{210}Pb sebagai induknya [7,13].

Pertama, sampel tembakau diperoleh dari 14 merek rokok yang dikonsumsi dan diproduksi di Indonesia, pada periode Januari - Februari 2014. Rokok dipisahkan antara tembakau, filter dan kertas pembungkus rokok. Selanjutnya tembakau dikeringkan menggunakan oven pada suhu $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ selama 2 hari, hingga massa tembakau mencapai kestabilan dan tidak berubah lagi massanya atau kering sempurna. Tembakau yang telah kering dihaluskan menggunakan blender hingga menjadi serbuk halus yang homogen. Serbuk tembakau ditimbang masing-masing 50 gram dan dimasukkan kedalam botol. Permukaan sampel tembakau yang telah dimasukkan dalam botol ditaburi dengan karbon aktif sebanyak 30 gram. Botol yang telah terisi dengan sampel tembakau dan karbon aktif ditutup rapat-rapat dan dipester (isolasi). Tujuannya agar gas hasil peluruhan terserap oleh karbon aktif

sehingga tetap terkungkung didalam botol dan tidak terlepas ke lingkungan. Sebelum dilakukan pencacahan, sampel didiamkan terlebih dahulu selama tiga hingga empat minggu untuk mendapatkan kondisi kesetimbangan antara induk dan anak luruhnya mengikuti prinsip *secular equilibrium* [14].

Kedua, sampel yang telah didiamkan selama empat minggu dilakukan pengukuran radioaktivitas sampel dengan menggunakan spektrometer sinar gamma, pengukuran dilakukan di lab Radiologi Lingkungan PSTNT-BATAN Bandung. Spektrometer tersebut dilengkapi dengan detektor *high purity germanium* (HPGe) buatan CANBERRA, model GR2519, yang memiliki efisiensi 25 % relatif terhadap detektor sintilator NaI(Tl) 3" x 3", serta satu set *multichannel analyzer* (MCA). Resolusi energi atau *full width at half maximum* (FWHM) detektor diperoleh 1,9 keV pada energi 1,33 MeV yang merupakan energi dari ^{60}Co . Penampilan dan analisis spektrum energi gamma menggunakan *software* PCA-II buatan *Nucleus* dan *Y-Spect* buatan *Ilham Yazid Spectrum*. Untuk mendapatkan spektrum latar belakang (*background*) atau kondisi tanpa cuplikan, dilakukan pencacahan botol kosong selama 50.000 detik, dilakukan setiap kali setelah tiga kali pengukuran sampel. Pengukuran radioaktivitas dilakukan dengan menempatkan botol sampel diatas detektor HPGe dan dicacah selama 50.000 detik (± 13.9 jam), setiap sampel dicacah dengan tiga kali pengulangan. Perlakuan dan kondisi sampel saat pencacahan dibuat sama dengan kondisi sumber standar yang

digunakan untuk kalibrasi energi dan kalibrasi efisiensi. Kalibrasi energi pada MCA dilakukan dengan menggunakan sumber standar titik multi energi yang berisi nuklida ^{241}Am (59,5 keV); ^{137}Cs (661,6 keV); dan ^{60}Co (1173 keV dan 1332 keV) [14].



Gambar 2. Spektrometer sinar gamma di lab. cacah PSTNT, BATAN, Bandung.

Ketiga, setelah tiga kali pencacahan dilakukan pencacahan *background* dengan waktu pencacahan dan kondisi sama dengan sampel. Kemudian konsentrasi aktivitas radionuklida yang diperoleh dari penelitian dapat dihitung menggunakan persamaan berikut,

$$A = \frac{\text{CPS}_{\text{sampel}} - \text{CPS}_{\text{background}}}{Y \epsilon m} \quad (1)$$

dimana: A (Bq/kg) adalah konsentrasi aktivitas tembakau, cps adalah nilai cacah per detik, Y adalah *yield* atau probabilitas kemunculan sinar gamma, ϵ adalah efisiensi alat, dan m adalah massa kering sampel tembakau.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Konsentrasi Radionuklida

Hasil pengukuran spektrometri gamma dihitung menggunakan persamaan (1), hasilnya seperti yang diperlihatkan pada

Tabel 1. Dimana konsentrasi ^{226}Ra bervariasi dari 2,86 hingga 6,04 Bq/kg dengan rata-rata $4,18 \pm 0,67$ Bq/kg, sedangkan konsentrasi ^{210}Pb bervariasi dari 3,04 hingga 6,76 Bq/kg dengan rata-rata $4,71 \pm 0,82$ Bq/kg, untuk ^{40}K bervariasi dari 23,57 hingga 32,69 Bq/kg dengan rata-rata $26,50 \pm 2,08$ Bq/kg. Konsentrasi induk (^{226}Ra) dan anak luruhnya (^{210}Pb) relatif hampir sama. Sedangkan konsentrasi ^{40}K relatif lebih besar, karena konsentrasi ^{40}K di alam sangat melimpah dan hampir bisa ditemukan didalam semua sampel lingkungan, termasuk sampel tanah dan tanaman. Konsentrasi ^{210}Po dihitung berdasarkan kesetimbangan peluruhan

radioaktif antara ^{210}Po sebagai anak luruhnya dan ^{210}Pb sebagai induknya, diperoleh $^{210}\text{Po} : ^{210}\text{Pb} = 0,87 \pm 0,10$ [7,13]. Dari perhitungan diperoleh konsentrasi ^{210}Po bervariasi dari 2,65 hingga 5,88 Bq/kg dengan rata-rata $4,09 \pm 0,71$ Bq/kg.

Konsentrasi yang diperoleh dari penelitian ini, pada masing-masing radionuklida alam cukup bervariasi, kemungkinan disebabkan oleh kondisi tanah tempat ditanam, cuaca dan lokasi penanaman tembakau yang berbeda sehingga kandungan radionuklida alam yang terserap oleh tanaman juga berbeda dan cukup bervariasi.

Tabel 1 Konsentrasi Radionuklida Alam didalam tembakau dari 14 merek rokok di Indonesia.

Merek	Konsentrasi Radionuklida Tembakau Kering (Bq/kg)			
	^{226}Ra	^{210}Pb	^{210}Po	^{40}K
A	3,75	4,92	4,28	27,35
B	4,06	3,04	2,65	24,66
C	2,86	4,47	3,89	26,88
D	3,65	4,35	3,79	23,57
E	4,18	5,58	4,86	25,98
F	2,98	3,44	2,99	27,66
G	4,45	3,64	3,16	23,86
H	6,04	4,83	4,20	25,46
I	3,24	4,39	3,82	30,47
J	4,03	5,89	5,13	24,00
K	4,85	5,99	5,21	32,69
L	5,07	6,76	5,88	28,47
M	5,04	4,66	4,05	24,10
N	4,32	3,91	3,40	25,80
Rata-rata	4,18	4,71	4,09	26,50

3.2 Estimasi Dosis Efektif

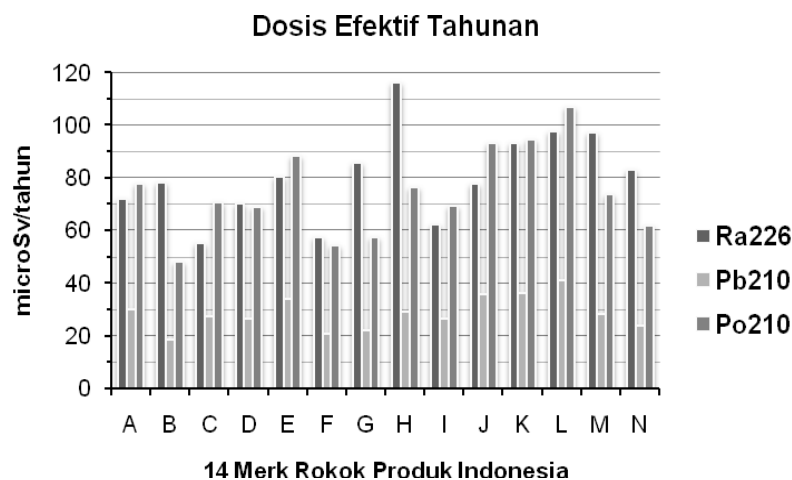
Konsentrasi aktivitas yang telah diperoleh pada Tabel 1, dapat digunakan untuk menghitung dosis efektif tahunan yang diterima oleh perokok dengan persamaan berikut,

$$H_E \text{ (Sv/Tahun)} = 0.75 \times M_T \times C_i \times E \quad (2)$$

dimana 0.5 adalah faktor transfer radionuklida dari tembakau hingga terserap masuk ke dalam tubuh, M_T (kg/tahun) jumlah konsumsi tembakau tahunan, C_i (Bq/kg) konsentrasi radionuklida pada sampel, dan E (Sv/Bq) merupakan faktor konversi dosis [7].

Faktor transfer radionuklida sama dengan 0,5 artinya 50 % konsentrasi radionuklida yang terdapat dalam tembakau rokok ikut menjadi asap rokok dan terhisap serta tersimpan pada jaringan tubuh dan sisanya sekitar 50 % tersimpan pada filter dan abu rokok serta terlepas ke udara [5]. Koefisien dosis efektif, E (Sv/Bq) menurut ICRP Publication 71 pada kasus inhalasi

(penghisapan) bagi orang dewasa adalah $3,5 \times 10^{-6}$ (Sv/Bq) untuk radionuklida ^{226}Ra , $1,1 \times 10^{-6}$ (Sv/Bq) untuk ^{210}Pb dan $3,3 \times 10^{-6}$ (Sv/Bq) untuk ^{210}Po [15]. Bila rata-rata massa tembakau untuk sebatang rokok buatan Indonesia sama dengan 1 gram dan seorang perokok menghabiskan 30 batang rokok dalam satu hari maka setara dengan mengkonsumsi 30 g perhari. Untuk satu tahun menjadi $30 \text{ gr} \times 365 = 10.950 \text{ gr}$ atau sekitar 11 kg tembakau pertahun, jadi konsumsi rata-rata tembakau pertahun ialah M_T (kg/tahun) = 11 kg. Dengan menggunakan data konsentrasi radionuklida ^{226}Ra , ^{210}Pb dan ^{210}Po didalam daun tembakau kering C_i (Bq/kg) yang tersedia Tabel 1 dan koefisien dosis efektif untuk ^{226}Ra , ^{210}Pb dan ^{210}Po yang diberikan oleh ICRP 71, dapat dilakukan perhitungan *dosis efektif tahunan*, H_E (Sv/Tahun) untuk kasus inhalasi bagi orang dewasa dengan mengikuti persamaan (2). $H_E = 0.5 \times M_T \times C_i \times E$, hasilnya seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Estimasi dosis efektif tahunan untuk radionuklida ^{226}Ra , ^{210}Pb dan ^{210}Po .

Tabel 2 Rata-rata konsentrasi radionuklida dalam tembakau rokok, koefisien dosis efektif dan estimasi dosis efektif tahunan.

Radionuklida	Konsentrasi (Bq/kg)	Koefisien Dosis Efektif (Sv/Bq)	Estimasi Dosis Efektif (μ Sv/tahun)
^{226}Ra	$4,18 \pm 0,67$	$3,50 \times 10^{-6}$	$80,46 \pm 12,93$
^{210}Pb	$4,71 \pm 0,82$	$1,10 \times 10^{-6}$	$28,47 \pm 4,96$
$^{210}\text{Po}^{1)}$	$4,09 \pm 0,71$	$3,30 \times 10^{-6}$	$74,31 \pm 12,96$
^{40}K	$26,50 \pm 2,08$	--- ²⁾	--- ²⁾

¹⁾ Konsentrasi ^{210}Po dihitung berdasarkan kesetimbangan antara induk dan anak luruhnya [13].

²⁾ Dosis efektif tidak dapat diestimasi karena koefisien dosis efektif ^{40}K tidak tersedia di ICRP 71 [15].

Estimasi dosis efektif tahunan untuk radionuklida ^{40}K tidak dapat dilakukan karena koefisien dosis efektif ^{40}K tidak tersedia di ICRP 71, walaupun konsentrasinya pada semua sampel cukup besar. Kalium atau potasium di lingkungan sangat berlimpah sehingga keberadaan ^{40}K menjadi cukup besar bahkan hampir dapat ditemukan pada setiap sampel lingkungan. ^{40}K merupakan salah satu radionuklida yang umum ada didalam makanan dan juga terdistribusi pada hampir seluruh jaringan tubuh manusia khususnya pada jaringan otot dan daging [16].

Estimasi dosis efektif tahunan untuk ^{226}Ra bervariasi dari 54,96 hingga 116,35 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$, rata-rata $80,46 \pm 12,93 \mu\text{Sv}/\text{tahun}$, untuk ^{210}Pb bervariasi dari 18,41 hingga 40,92 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$, rata-rata $28,47 \pm 4,96 \mu\text{Sv}/\text{tahun}$ sedangkan ^{210}Po bervariasi dari 48,05 hingga 106,79 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$ dengan rata-rata $74,31 \pm 12,96 \mu\text{Sv}/\text{tahun}$. Total estimasi dosis efektif rata-rata pertahun karena menghirup asap rokok dapat diperoleh dengan cara menjumlahkan dosis rata-rata dari ^{226}Ra , ^{210}Pb dan ^{210}Po , hasilnya 183,24 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$.

Batas total dosis rata-rata pertahun untuk sumber radiasi alam di seluruh dunia adalah 2400 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$, sebagian dari itu merupakan paparan radiasi secara *inhalasi*, yaitu: 1260 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$ [17]. Bila hasil penelitian ini dibandingkan dengan batas dosis paparan radiasi secara inhalasi di dunia 1260 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$ maka nilai dosis efektif pertahun yang diterima dari perokok di Indonesia masih jauh dibawah, 183,24 : 1260 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$ atau sekitar 14,5%. Tapi perlu diingat bahwa yang dimaksud dengan batas dosis secara inhalasi untuk umum adalah dosis yang diterima karena menghirup udara ketika bernafas. Jadi tanpa merokokpun orang akan menghirup radionuklida alam dari udara. Apalagi merokok, semakin bertambah jumlah radionuklida alam yang masuk kedalam tubuh, sehingga bertambah pula resiko terserang penyakit kanker dan penyakit-penyakit lainnya.

4. KESIMPULAN

Rata-rata konsentrasi radionuklida dalam tembakau rokok yang diperoleh dari 14 merek rokok Indonesia pada periode Januari-Februari 2014, untuk $^{40}\text{K} = 26,50$

Bq/kg, ^{226}Ra = 4,18 Bq/kg, ^{210}Pb = 4,71 Bq/kg dan ^{210}Po = 4,09 Bq/kg. Estimasi dosis efektif tahunan akibat inhalasi pada orang dewasa perokok untuk ^{226}Ra = 80,46 \pm 12,93 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$, sedangkan ^{210}Pb = 28,47 \pm 4,96 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$ dan ^{210}Po = 74,31 \pm 12,96 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$.

Nilai dosis efektif pertahun yang diterima dari perokok yang menghisap asap rokok di Indonesia 183,24 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$ atau sekitar 14,5 % dari batas dosis paparan radiasi secara inhalasi di dunia 1260 $\mu\text{Sv}/\text{tahun}$. Hasilnya masih relatif kecil, namun demikian bila zat radioaktif dan bahan kimia dalam asap rokok memasuki aliran darah maka akan dapat mempengaruhi tubuh secara keseluruhan. Inilah sebabnya mengapa merokok menyebabkan begitu banyak penyakit, termasuk kanker, penyakit jantung dan berbagai penyakit paru-paru.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada Pak Widanda, Neneng Nur Aisyah, dan Achmad Chalil Afif yang telah menyiapkan peralatan spektrometer gamma, mengisi ulang nitrogen cair dan pengadaan sampel rokok dari berbagai merek.

6. DAFTAR PUSTAKA

1. Karagueuzian HS, White C, Sayre J, Norman A. Cigarette smoke radioactivity and lung cancer risk. *Nicotine Tobacco Research*, 2012;14(1), pp. 79-90.
2. Cornfield J, Haenszel W, Hammond EC, Lilienfeld AM, Shimkin MB and Wynder EL, Smoking and lung cancer : Recent evidence and discussion of some questions. *International Journal of Epidemiology* 38, pp1175-1191, 2009.
3. Borgerding M, Klus H, Analysis of complex mixtures-Cigarette smoke. *Journal of Experimental Toxicologic Pathology*, 2005, pp43-73.
4. Shousha HA, Ahmad F, Natural radioactivity contents in tobacco and radiation dose induced from smoking, *Radiation Protection Dosimetry* 150, 2012 (1), pp91-95.
5. Nagamatsu T, Sakoda A, Kataoka T, Ono T, Yamaoka K. An Assessment of Radioactivity Levels of ^{210}Pb and ^{40}K in Tobacco and Radiation Exposure from Smoking. *Acta Medica Okayama*, 2011; 65, (2), pp91-95,.
6. Landsberger S, Lara R, Landsberger SG, Non-destructive determination of uranium, thorium and ^{40}K in tobacco and their implication on radiation dose levels to the human body, *Radiation Protection Dosimetry* , 2015; 167 (1-3), pp243-246.
7. Papastefanou C. Radioactivity of Tobacco Leaves and Radiation Dose Induced from Smoking. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2009, 6, pp558-567.
8. Kubalek D, Serša G, Štok M, Benedik L, Jeran Z, Radioactivity of cigarettes and the importance of ^{210}Po and thorium isotopes for radiation dose assessment due to smoking, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2016, 155-156, pp97-104.
9. Robert-Csaba B, Hedvig S, Szabolcs K, ^{210}Po inhalation due to smoking : a dose estimation. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2015; 306, pp257-261.

10. Sakoda A, Fukao K, Kawabe A, Kataoka T, Hanamoto K, Yamaoka K, Radioactivity of ^{210}Pb in Japanese cigarettes and radiation dose from smoking inhalation. *Radiation Protection and Dosimetry*, 2012; 150, pp109-113.
11. Taroni M, Zagà V, Bartolomei P, Gattavecchia E, Pacifici R, Zuccaro P, Esposito M, ^{210}Pb and ^{210}Po concentrations in Italian cigarettes and effective dose evaluation, *Health Physics*, 2014; 107 (3), pp195-199.
12. Tokonami S, Kovacs T, Yoshinaga S, Kobayashi Y, Ishikawa T. ^{210}Po and ^{210}Pb Inhalation Dose by Cigarette Smoking in Gansu and Yunnan Provinces, China. *Japan Journal Health Physics*, 2008; 43 (2), pp131-134.
13. Papastefanou A.C., Radiation dose from cigarette tobacco, *Radiat Prot Dosimetry*, 2007; 123 (1), pp68-73.
14. Khandaker MU, Pankan Jojo PJ, Kassim HA. Determination of Primordial Radionuclides in Natural Samples Using HPGE Gamma-Ray Spectrometry. *SciVerse ScienceDirect, Asia-Pacific Chemical, Biological and Environmental Engineering Society, Procedia I*, 2012, pp187-192.
15. International Commission of Radiological Protection (ICRP), Age-dependent Doses to Members of the Public from Intake of Radionuclides, Part 4 Inhalation Dose Coefficients, 1995, ICRP Publication 71, Ann. ICRP, 25.
16. Chang R, *Chemistry*. McGraw-Hill Higher Education, 2007, ISBN 978-0-07-110595-8, pp52.
17. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. New York: United Nations (published 2010). p.4. ISBN 978-92-1-142274-0, Retrieved 9 November 2012.