

Isotop Alam Radon-222 untuk Studi Interaksi Air Sungai Ciliwung dan Air Tanah Dangkal

Environmental Isotope of Radon-222 for Ciliwung River and Shallow Groundwater Interaction Study

Bungkus Pratikno^{*}, E. Ristin Puji Indiyati

Pusat Aplikasi Isotop Dan Radiasi, Badan Tenaga Nuklir Nasional Jakarta

*E-mail: bungkus@batan.go.id

ABSTRACT

Aquifer in river bank area is mostly susceptible toward pollution occurring in river. One of parameters to determine the interaction process between groundwater and river is a natural isotope of ^{222}Rn . The significant difference of radon concentration in groundwater and river water can be utilized as a scientific basis for investigating groundwater infiltration in river bank. Those studied parameters are residence time and infiltration rate. The research using ^{222}Rn had been conducted in shallow groundwater of Ciliwung river bank - South Jakarta during rainy and dry season. The range of ^{222}Rn concentration in shallow groundwater monitored in dry season was between 666 - 2590 Bq/m³ which was higher than that of rainy season ranging at 440 to 1546 Bq/m³. Otherwise, concentration of ^{222}Rn in river water could not be detected (its ^{222}Rn concentration = 0 Bq/m³) due to its much lower concentration either rainy or dry season. During dry season monitoring, equilibration between groundwater and river water was reached at the distance approximately 98-140 m away from river side. Estimating residence time based on ^{222}Rn concentration at nearest site from the river and at equilibration area was 4.2 days such that the infiltration rate from river water into aquifer might be 7.8 m/day.

Keywords: ^{222}Rn , groundwater, residence time, infiltration rate.

PENDAHULUAN

Sungai di daerah kering atau semi kering merupakan sumber daya alam yang paling penting bagi penduduk lokal. Sungai tidak hanya menyediakan akses terhadap sumber daya air untuk kebutuhan domestik dan pertanian melainkan juga berperan penting dalam pemeliharaan kesehatan ekosistem. Demikian halnya dengan sungai Ciliwung, sungai ini adalah sungai terbesar dan terpenting dari 13 sungai yang melintasi ibu kota Jakarta. Panjang sungai Ciliwung dari hulu hingga muara berkisar 117 km dengan luas cakupan sekitar 387 km². Sungai ini berhulu di Gunung Pangrango, Jawa Barat, mengalir melalui Puncak, Ciawi, lalu membelok ke utara melalui Bogor, Depok, Jakarta dan bermuara di Teluk Jakarta. Sepanjang alirannya, sungai ini melalui daerah pertanian, perumahan dan pabrik. Dari beberapa penelitian, pencemaran sungai Ciliwung semakin parah akibat limbah yang diduga berasal dari pabrik dan tempat usaha di sepanjang aliran sungai. Selain itu, masuknya air laut ke sungai Ciliwung turut menurunkan kualitas air sungai (Satmoko, 2010; Hendrawan, 2008).

Akuifer aluvial seperti yang tersusun di bantaran sungai Ciliwung umumnya mem-

punyai hubungan hidrolik dengan air sungai. Keberadaan akuifer yang berdekatan dengan sungai dipastikan mempunyai cadangan air yang tinggi sehingga sering dimanfaatkan dalam jumlah besar. Eksploitasi air tanah yang berlebihan karena padatnya pemukiman dan industri seperti di Jakarta dapat menimbulkan penurunan muka air tanah. Jika hal ini terjadi maka akan terjadi penyusutan air tanah dangkal, termasuk air permukaan (misalnya air sungai), ke air tanah dalam (*deep groundwater*) yang umumnya digunakan sebagai pemasok air bersih (Thomas & Kristi, 2009). Senyawa pencemar yang terdapat pada air permukaan maupun air tanah dangkal tentu akan ikut mencemari air tanah dalam. Proses penyusutan atau interaksi air sungai ke air tanah dangkal hingga ke akuifer air tanah dalam (*deep groundwater*) sangat tidak dikehendaki. Proses interaksi air tanah dangkal dan air permukaan sangat rumit dimana air sungai dapat mengisi ke badan air tanah atau sebaliknya air sungai memperoleh air dari air tanah di sepanjang alirannya (Baskaran *et al.*, 2009). Interaksi air tanah-air sungai di daerah tangkapan air dikendalikan oleh empat faktor utama yakni a) posisi aliran sungai terhadap lanskap dan morfologi daerah tangkapan, b)

konduktivitas hidrolis sedimen dasar sungai dan deposit alluvial yang terasosiasi; c) hubungan elevasi sungai terhadap muka air tanah dan d) proses fluvial (erosi, transportasi dan sedimentasi), antropogenik dan geologi (Yu *et al.*, 2013).

Pemahaman proses hidrogeologi tentang interaksi air sungai dan air tanah adalah penting untuk pengelolaan yang komprehensif pada sumber daya air tanah dan menilai potensi dampak peningkatan penggunaan air tanah terhadap ekosistem. Proses interaksi air tanah-air sungai juga penting diketahui yakni untuk pengelolaan sumber kontaminan yang potensial mencemari air sungai dan untuk mendukung identifikasi jalur migrasi kontaminan serta dampaknya terhadap sistem ekologi (Yueqing *et al.*, 2016; Jorge *et al.*, 2015). Mekanisme interaksi air sungai dan air tanah dapat diamati dengan perunut konservatif seperti zat warna *fluorocens* yakni dengan mengamati kurva *breakthrough*. Selain itu, mekanisme interaksi air sungai dengan air tanah juga dapat ditelusuri dengan menerapkan isotop alam (seperti: ^{222}Rn , $^3\text{H-He}$) dan gas antropogenik (seperti: CFC dan SF_6) (Jorge *et al.*, 2015; Tobias *et al.*, 2010). Parameter suhu dan konduktivitas listrik (EC) juga umum digunakan untuk mempelajari interaksi air sungai-air tanah karena kemudahan dalam pengukuran dan berupa parameter fisik. Akan tetapi kedua parameter ini memerlukan *data logger* dan sensor modern yang terus terpasang di lapangan untuk memperoleh data terhadap deret waktu (*time series*). Parameter EC dan konsentrasi ^{222}Rn telah diterapkan di bantaran sungai Thur di timur laut Switzerland untuk mengetahui waktu tinggal air sungai selama melalui air tanah (Tobias *et al.*, 2010).

^{222}Rn adalah isotop alam bersifat radioaktif yang merupakan anak luruh dari Radium-226 (^{226}Ra) dengan memancarkan sinar (α). Isotop ^{222}Rn mempunyai waktu paruh 3,8 hari. Isotop ^{226}Ra merupakan hasil peluruhan dari deret Uranium-238 (^{238}U) dengan waktu paruh 1620 tahun. Air tanah memperoleh ^{226}Ra melalui dua mekanisme utama yaitu pelarutan dari matriks batuan di dalam akuifer dan semburan ^{226}Ra ke dalam larutan selama peluruhan ^{238}Th (Thorium-238). Aktivitas ^{222}Rn mencapai kesetimbangan sekuler dengan ^{226}Ra dalam periode hanya beberapa minggu. Sebagai gas mulia, ^{222}Rn mempunyai sifat *inert*, tidak terabsorpsi oleh padatan, tidak berwarna, tidak berbau dan tidak berasa.

Berbeda dengan ^{226}Ra , isotop ^{222}Rn sangat larut dalam air sehingga dapat terakumulasi dalam air tanah. Konsentrasi ^{222}Rn dalam air tanah sangat tergantung pada konsentrasi isotop ^{226}Ra dalam air tanah dan waktu tinggal air tanah dalam akuifer (Yueqing *et al.*, 2016; Robert *et al.*, 2009).

Umur paruh nuklida tertentu dalam deret peluruhan uranium menawarkan kemungkinan untuk studi hidrogeologi seperti penentuan umur air tanah atau waktu tinggal air tanah. Salah satunya adalah isotop ^{222}Rn yang mulai banyak digunakan dalam studi hidrogeologi karena sifatnya yang konservatif, waktu paruh yang pendek, mudah untuk pengambilan sampel dan sederhana dalam pengukuran. Umur paruh yang pendek dari isotop ^{222}Rn memungkinkan isotop radon sebagai perunut alam yang potensial untuk mempelajari proses-proses transpor dengan karakteristik waktu kurang dari 10 hari. Sifat radon yang mudah terlepas dari air dapat digunakan untuk mengestimasi waktu tinggal air tanah di dalam akuifer, yakni dengan cara menginjeksikan air dengan aktivitas ^{222}Rn tinggi (Robert *et al.*, 2009).

Selain itu, isotop ^{222}Rn dapat digunakan untuk mengindikasikan keberadaan air tanah muda (*young groundwater*). Dalam hal ini isotop ^{222}Rn digunakan untuk merunut interaksi air permukaan (misalnya air sungai) dengan air tanah. Karena aktivitas radon dalam air tanah lebih tinggi (2-10 kBq/m^3) daripada di air permukaan (1-100 Bq/m^3) maka perbedaan ini telah digunakan untuk mempelajari pengisian aliran air tanah di sekitar sungai. Demikian juga sebaliknya, laju penyusupan atau infiltrasi air sungai ke dalam air tanah dapat ditentukan melalui pengukuran aktivitas isotop ^{222}Rn dalam air tanah (Kluge *et al.*, 2007). Penentuan waktu tinggal air tanah dengan analisa ^{222}Rn mengasumsikan bahwa emanasi pada akuifer yang diteliti adalah konstan baik pada ruang dan waktu. Karena radon adalah gas mulia dan konsentrasinya di atmosfer sangat rendah (fraksi mol = 6×10^{-20}) maka perpindahan gas menyebabkan konsentrasi ^{222}Rn dalam air sungai sangat rendah. Ketika air sungai menginfiltirasi, maka air sungai tidak mengalami perpindahan gas dengan atmosfer lagi. Saat itu air sungai mulai mengangkut ^{222}Rn hasil dari emanasi mineral. Karena umur paruh yang pendek maka ^{222}Rn dapat digunakan untuk memperkirakan waktu tinggal air tanah dengan kisaran hingga 2 minggu.

Konsentrasi ^{222}Rn berkisar 200Bq/m^3 pada air sungai hingga 10.100Bq/m^3 pada air tanah di bantaran sungai Thur di Timur laut Switzerland (Tobias *et al.*, 2010).

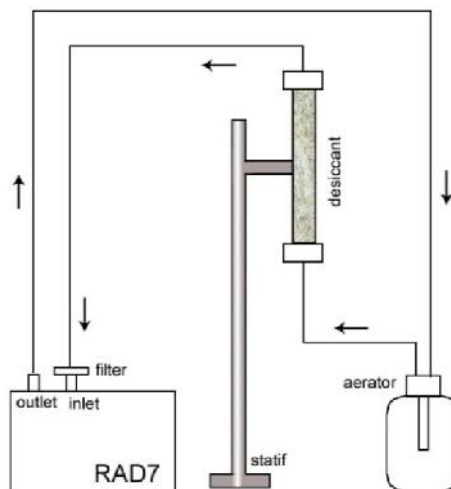
Dalam penelitian ini, contoh air tanah dangkal dan air sungai Ciliwung yang diamati adalah di sub daerah aliran sungai (DAS) Ciliwung di daerah Cilandak - Jakarta Selatan. Daerah ini dipilih karena terdapat beberapa industri yang menghasilkan limbah. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan air sungai dan air tanah dangkal dengan menggunakan parameter ^{222}Rn . Tujuan selanjutnya adalah memperkirakan laju penyusupan air sungai ke dalam akuifer dangkal berdasarkan waktu tinggal dan laju infiltrasi. Data laju infiltrasi air sungai diperlukan untuk memprediksi laju migrasi kontaminan ke air tanah sehingga pengelolaan sumber daya air tanah dapat dilakukan secara efektif.

METODE

Pengukuran aktivitas ^{222}Rn dalam sampel air.

Pengambilan air tanah dangkal dilakukan di Jakarta Selatan dengan jarak yang berbeda-beda dari tepi sungai Ciliwung. Penentuan titik koordinat dilakukan dengan menggunakan sistem navigasi GPS (*Global Positioning System*). Sampel air tanah yang diambil berjumlah 6 titik dan air sungai sebanyak 4 titik, pengambilan sampel air tanah dilakukan pada 2 musim. Sebanyak kira-kira 250 ml sampel air dimasukkan ke dalam botol sampel gelas kemudian dihubungkan dengan peralatan Rad7 radon detektor dari *DurrIDGE Company* yang di dalamnya terdapat detektor sinar α . Alat ini dirancang untuk analisis radon dalam fase gas dengan sedikit sampel air (250 ml). Rangkaian pengukuran aktivitas ^{222}Rn dalam sampel air dengan menggunakan alat Rad7 seperti diperlihatkan pada Gambar 1. Pengukuran aktivitas ^{222}Rn yang terkandung dalam sampel air dilakukan secara in situ dan sesegera mungkin. Hal ini bertujuan untuk mencegah lolosnya gas radon dari dalam sampel air ke atmosfer.

Pada awal prosedur pengukuran, siklus gas tertutup tidak mengandung radon. Udara disirkulasikan dalam ruang tertutup melalui botol gelas berisi sampel air untuk mengekstrak radon. Botol sampel ini harus tertutup rapat untuk mencegah radon terlepas ke udara.

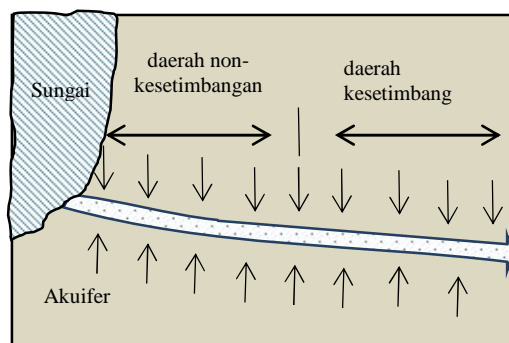


Gambar 1. Skema aliran pengukuran aktivitas ^{222}Rn dalam air tanah (atas) dengan menggunakan alat Rad7 H₂O radon detektor (bawah)

Proses aerasi ini dilakukan untuk melepaskan gas radon (*outgassing*) dari sampel air. Aerasi berlanjut hingga kesetimbangan kelarutan antara fase air dan fasa gas tercapai. Radon yang telah terekstraksi dari sampel air mengalir melalui unit pengering (*desiccant*) untuk melepaskan uap airnya. Konsentrasi ^{222}Rn dicacah dengan RAD7 radon detektor selama 5 menit dan diulang hingga empat kali sebagai aktivitas fase gas, selanjutnyadikonversi menjadi aktivitas fase air (Kluge *et al.*, 2007).

Penentuan waktu tinggal air tanah dan laju infiltrasi air sungai

Penentuan waktu tinggal air tanah dan laju infiltrasi air sungai didasarkan pada kenyataan bahwa air sungai mempunyai konsentrasi isotop ^{222}Rn rendah. Ini disebabkan oleh adanya arus turbulen sehingga radon mudah terlepas ke udara. Di sisi lain, air tanah umumnya mempunyai konsentrasi isotop ^{222}Rn tinggi yang disebabkan adanya kandungan radium yang berasal dari pelarutan batuan dan lapisan tanah yang dilalui aliran air tersebut. Proses pelepasan gas radon ke dalam air tanah akibat emanasi deposit aluvial dan pengaruh infiltrasi air sungai ke dalam sistem akuifer, diperlihatkan pada Gambar 2. Air sungai dengan konsentrasi radon rendah menginfiltrasi ke dalam akuifer dan terus mengabsorpsi radon yang dilepaskan oleh tanah. Proses infiltrasi air sungai ke air tanah ditandai penurunan konsentrasi radon yang semakin rendah pada air tanah.



Gambar 2. Proses pelepasan radon dalam tanah dan pengaruh infiltrasi air sungai ke dalam akuifer

Konsentrasi isotop ^{222}Rn dalam air tanah dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut (Trinh, 2003) :

$$C_t = C_e(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1)$$

dimana:

C_t : konsentrasi isotop ^{222}Rn air tanah pada waktu t

C_e : konsentrasi isotop ^{222}Rn air tanah pada keadaan setimbang

λ : konstanta peluruhan isotop ^{222}Rn ($\lambda = 0,18/\text{hari}$)

Waktu tinggal (t - residence time) air tanah dalam suatu akuifer dihitung dengan persamaan:

$$t_r = (1/\lambda) \ln \left[\frac{C_e}{C_e - C_t} \right] \quad (2)$$

Persamaan (2) mensyaratkan konsentrasi radon C_e diketahui, yakni ditentukan melalui pengukuran konsentrasi radon di lokasi yang cukup jauh dari sungai. Jika konsentrasi radon air sungai C_0 pada saat t_0 dan $t_{res} = t - t_0$ maka persamaan (2) dapat diterapkan untuk menghitung waktu tinggal air tanah yang terinfiltrasi oleh air sungai. Persamaan (2) digunakan untuk menghitung waktu tinggal air tanah apabila konsentrasi radon di air sungai (air permukaan) dapat diabaikan. Sebaliknya, jika konsentrasi air sungai tidak dapat diabaikan, maka

perhitungan waktu tinggal air tanah dihitung dengan persamaan (3).

$$t_r = (1/\lambda) \ln \left[\frac{C_e - C_u}{C_e - C_t} \right] \quad (3)$$

Laju infiltrasi (m/hari) air sungai ke dalam akuifer air tanah dihitung dengan persamaan umum sebagai berikut:

$$V_{it} = \left[\frac{S}{t_r} \right] \quad (4)$$

dimana S adalah jarak sumur dari sungai pada daerah non kesetimbangan (m).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Secara umum wilayah DAS Ciliwung terbentuk oleh batuan vulkanik yang bersifat piroklastik, yang berasal dari endapan (batuan sedimen) dua gunung berapi, yaitu Gunung Pangrango (berupa batuan satuan breksi tufaan) dan Gunung Salak (berupa aluvium/kal dan kipas aluvium/kpal). Endapan permukaan umumnya berupa aluvial yang tersusun oleh tanah, pasir, dan kerikil hasil dari pelapukan endapan. Bahan induk geologi tersebut menghasilkan tanah yang relatif subur. Jenis tanah yang dominan ialah latosol coklat kemerahan, andosol coklat dan aluvial kelabu (Rommy & Trihono, 2012). Sistem akuifer Jakarta bersifat *multi layers* yang dibentuk oleh endapan Kuartar dengan ketebalan mencapai sekitar 250 m. Ketebalan akuifer tunggal (*single aquifer layer*) antara 1 - 5 m terutama berupa lanau sampai pasir halus (Sudaryanto & Suherman, 2008).

Pada penelitian ini air tanah yang diamati adalah akuifer air tanah bebas (*unconfined aquifer*) yakni kedalaman 0-40 m (Sudaryanto & Suherman, 2008), adapun titik sampling seperti terlihat pada Gambar 3, terdiri dari 6 (enam) buah sumur bor yang diberi kode S1 sampai dengan S6 dan beberapa titik air di sungai Ciliwung dengan kode SC. Pada tabel 1 dicantumkan konsentrasi isotop ^{222}Rn yang diukur dari sampel air sumur bor S1 dengan hasil pengukuran TBS1, S2 dengan hasil pengukuran TBS2 dan seterusnya hingga sampel air S6 dengan kode pengukuran TBS6 serta rata-rata pengukuran sampel air sungai Ciliwung, pada Tabel 1 juga tertera jarak titik sampel air sumur terhadap air sungai pada pengukuran musim kemarau dan penghujan. Dalam penelitian ini pengukuran dilakukan pada sampel S1 (TBS1) hingga S6 (TBS6) dengan pertimbangan bahwa titik-titik sampel tersebut merupakan sumur bor milik penduduk sekitar yang berada dekat dengan sungai Ciliwung dan mudah dilakukan pengambilan

sampelnya. Sumur bor yang di sampling dan diukur aktivitas radon-222 ini sepanjang Pengukuran konsentrasi ²²²Rn pada air tanah maupun air sungai dilakukan pada hari pengamatan yang sama untuk meminimalkan perbedaan pengaruh debit air sungai.

Konsentrasi isotop ²²²Rn pada air tanah dangkal di DAS Ciliwung di Kecamatan Cilandak Jakarta Selatan pada musim kemarau bervariasi pada kisaran antara 666 hingga 2590 Bq/m³.



Gambar 3. Lokasi pengambilan sampel air tanah dangkal dan air sungai Ciliwung di DAS Cilandak Jakarta Selatan

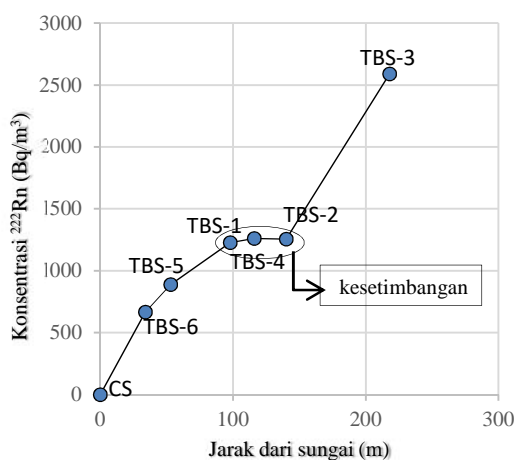
Dari Tabel 1 terlihat bahwa konsentrasi isotop ²²²Rn dibagi dalam tiga kelompok. Kelompok pertama yakni dari jarak 98 m hingga ke sungai, konsentrasi isotop ²²²Rn pada air tanah mengalami penurunan dari 1226 Bq/m³ hingga 666 Bq/m³. Kelompok kedua, isotop ²²²Rn pada air tanah mengalami kemiripan konsentrasi pada jarak 98 m hingga 140 m dari S. Ciliwung yakni antara 1226 – 1255 Bq/m³. Kelompok ketiga konsentrasi ²²²Rn dari air tanah dangkal mengalami peningkatan pada jarak 218 m dari sungai Ciliwung sebesar 2590 Bq/m³ dan 3400 Bq/m³ pada jarak 675 m dari sungai Pesanggrahan di lokasi PAIR (06° 17' 33.9"LS dan 106° 46' 26.5" BT). Konsentrasi radon dalam air tanah bervariasi tergantung pada kandungan radioaktivitas isotop dalam matriks akuifer. Sebagai contoh, pada matriks sedimen klastik maka konsentrasi radon < 2 Bq/L (= 2000 Bq/m³) sedangkan pada matriks batuan beku dan metamorfik maka konsentrasi radon > 200 Bq/L (Jorge *et al.*, 2015).

Tabel 1. Pengukuran konsentrasi isotop ²²²Rn air tanah di Sub-DAS Ciliwung Cilandak – Jakarta Selatan pada musim kemarau dan penghujan

No	Sampel	Jarak dari sungai (m)	Konsentrasi ²²² Rn (Bq/m ³)	
			Kemarau	Penghujan
1.	TBS-3	218	2590	1130
2.	TBS-2	140	1255	441
3.	TBS-4	116	1260	442
4.	TBS-1	98	1226	1546
5.	TBS-5	53	888	834
6.	TBS-6	34	666	440
7.	S. Ciliwung	0	0	0
8.	Air hujan PAIR*	-	0	
9.	Air tanah dangkal PAIR	675 m dari Sungai Pesanggrahan	3400	

*) PAIR = Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi – BATAN

Gambar 4 memperlihatkan tiga pembagian kelompok konsentrasi radon (tanpa lokasi air tanah dangkal di PAIR) pada musim kemarau. Konsentrasi radon lebih rendah pada air tanah yang berdekatan dengan sungai, ini mengindikasikan bahwa air tanah muda (*young groundwater*) atau air tanah yang banyak mengalami pencampuran dengan air permukaan, atau sebagai akibat dari adanya pengaruh infiltrasi air sungai ke dalam akuifer alluvial yang lebih dominan daripada aliran keluaran air tanah ke dalam sungai. Konsentrasi ^{222}Rn dalam air sungai pada umumnya rendah akan tetapi dapat berubah karena adanya masukan dari aliran air tanah, proses evaporasi, pertukaran gas dengan atmosfer, dan peluruhan radioaktif dalam air sungai itu sendiri. Pada umumnya, pengaruh konsentrasi ^{222}Rn di atmosfer dan pertumbuhan ^{222}Rn dalam air sungai akibat peluruhan ^{226}Ra dalam sedimen tersuspensi dapat diabaikan. Faktor utama tingginya aktivitas radon dalam air sungai adalah masuknya sejumlah besar massa air tanah yang mengandung radon, relatif terhadap air sungai. Setelah air tanah yang mengandung radon keluar ke badan air sungai, aktivitas radon pada air sungai juga akan menurun oleh karena pertukaran gas dengan atmosfer selama berlangsung aliran turbulen dan karena adanya peluruhan radioaktif (Jorge *et al.*, 2015). Dalam penelitian ini, pengukuran konsentrasi radon di empat titik sungai Ciliwung menunjukkan nilai 0 Bq/m^3 . Dengan demikian, keluaran air tanah ke badan sungai Ciliwung dianggap tidak ada pada saat pengamatan di musim kemarau.



Gambar 4. Konsentrasi isotop ^{222}Rn dalam akuifer air tanah dangkal terhadap jarak dari sungai Ciliwung pada musim kemarau

Pada kelompok pertama yaitu TBS-5 Pada kelompok pertama yaitu TBS-5 dan TBS-6, tampak penurunan konsentrasi isotop ^{222}Rn pada air tanah. Menurut gambar 4, kelompok ini termasuk dalam daerah non kesetimbangan hingga jarak 116 m dari sungai. Pengaruh infiltrasi air sungai ke akuifer air tanah jelas tampak pada kelompok ini. Dari empat titik lokasi air sungai Ciliwung di kecamatan Cilandak menunjukkan konsentrasi isotop ^{222}Rn adalah 0 Bq/m^3 . Nilai ini sama dengan contoh air hujan yang diambil di lokasi PAIR seperti terdapat pada Tabel 1. Konsentrasi isotop ^{222}Rn pada air sungai dan air hujan tidak terdeteksi kemungkinan karena di bawah nilai limit deteksi alat Rad7 H_2O yang digunakan dalam penelitian ini. Alat Rad7 H_2O dirancang untuk pengukuran konsentrasi radon tinggi dengan volume sampel air sedikit yakni 250 ml. Dalam beberapa penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi isotop ^{222}Rn pada air sungai adalah sekitar 1-100 Bq/m^3 [10]. Konsentrasi isotop ^{222}Rn atmosferik di Abatuba Brazil menunjukkan kisaran dari bawah batas deteksi (< 2 Bq/m^3) hingga di atas 30 Bq/m^3 [14]. Konsentrasi isotop ^{222}Rn pada air hujan di daerah Yatta – Palestine berkisar 37 Bq/m^3 hingga 260 Bq/m^3 . Konsentrasi isotop ^{222}Rn pada air hujan mencapai level tinggi jika ada petir yang menyertainya. Menurut hipotesa, petir mengandung muatan listrik positif yang dapat meningkatkan proses peluruhan isotop (Issam *et al.*, 2017).

Pada kelompok kedua yaitu air tanah dangkal pada jarak antara 98 m – 140 m dari sungai (sumur TBS-1, TBS-2, TBS-4) diperkirakan telah mengalami kesetimbangan dengan air sungai. Rata-rata konsentrasi isotop ^{222}Rn air tanah pada saat kesetimbangan (C_0) adalah $1247 \pm 18 \text{ Bq/m}^3$. Menurut penelitian di Nam Dinh – Vietnam, kesetimbangan pada akuifer sedimen alluvial dengan ketebalan hingga 25 m terjadi pada jarak 130 m dari sungai dengan rata-rata konsentrasi isotop ^{222}Rn di air tanah adalah 24.944 Bq/m^3 (Trinh, 2003). Konsentrasi isotop ^{222}Rn pada kelompok kesetimbangan ini digunakan untuk menghitung waktu tinggal air tanah. Karena konsentrasi isotop ^{222}Rn pada air sungai (C_0) sangat kecil maka C_0 dapat diabaikan sehingga waktu tinggal air tanah dihitung dengan menggunakan persamaan (2).

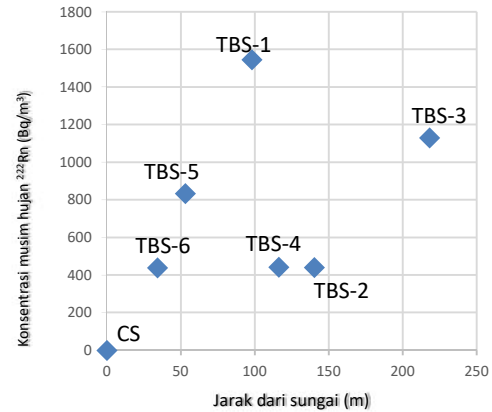
Dari perhitungan persamaan (2) maka diperoleh waktu tinggal air tanah untuk sumur TBS-6 (jarak 34 m dari sungai) adalah sekitar

4,2 hari. Kecepatan infiltrasi air sungai hingga ke sumur TBS-6 yang dihitung dengan persamaan (4) adalah 8,0 m/hari. Jika diteruskan hingga ke sumur TBS-5 (jarak 53 m dari sungai) maka diperoleh waktu tinggal air tanah adalah sekitar 6,9 hari dan kecepatan infiltrasi air sungai adalah 7,7 m/hari. Dari kedua sumur tersebut maka diperoleh rata-rata kecepatan infiltrasi air sungai di DAS Ciliwung di daerah Cilandak - Jakarta Selatan pada musim kemarau adalah 7,8 m/hari. Penelitian yang dilakukan di Nam Dinh – Vietnam didapatkan kecepatan infiltrasi air sungai ke akuifer air tanah adalah sekitar 5,1 m/hari (Trinh, 2003). Penelitian yang dilakukan Hoehn & Gunten (1989) di Switzerland menunjukkan kecepatan infiltrasi air sungai ke akuifer air tanah adalah sekitar 4,6 m/hari. Pada penelitian yang dilakukan oleh Tobias *et al.*, (2010) di bantaran sungai Thur di timur laut Switzerland menunjukkan waktu tempuh air sungai selama menginfiltrasi air tanah (5m dari sungai) adalah sekitar 4,6 hari.

Pada kelompok ketiga yakni air tanah dengan jarak lebih dari 218 m dari sungai Ciliwung mencirikan air tanah dangkal pada umumnya. Laju pelepasan radon ke air tanah tergantung pada struktur mikro batuan pada akuifer seperti distribusi ukuran butiran, perubahan permukaan butiran dan kandungan air pori (Hoehn & Gunten, 1989). Kondisi lingkungan seperti daerah karst akan meningkatkan laju pelepasan radon ke air tanah. Beberapa industri non nuklir yang didalam proses produksinya melibatkan bahan mentah yang mengandung ²²⁶Ra seperti industri pupuk fosfat, timah, minyak clan gas, semen, bauksit memberikan kontribusi radon pada air tanah.

Hasil pengukuran ²²²Rn pada musim penghujan seperti terlihat pada Gambar 5, menunjukkan kejadian yang berbeda dari hasil yang diperoleh pada musim kemarau. Pengaruh jarak sumur terhadap air sungai tidak menunjukkan peningkatan konsentrasi ²²²Rn air tanah yang teratur, seperti ditunjukkan pola pada Gambar 2. Dengan grafik seperti ini maka tidak dapat ditentukan daerah kesetimbangan antara air sungai dan air tanah berdasarkan parameter ²²²Rn. Pada musim penghujan, pengaruh curah hujan yang tinggi dan air sungai terhadap air tanah tidak dapat dibedakan karena keduanya mempunyai konsentrasi yang sama yaitu sebesar ²²²Rn = 0 Bq/m³. Akibatnya, pengukuran ²²²Rn air tanah pada

musim penghujan dengan variasi jarak sumur terhadap sungai tidak mencerminkan infiltrasi air sungai itu sendiri.



Gambar 5. Konsentrasi isotop ²²²Rn dalam akuifer air tanah dangkal terhadap jarak dari sungai Ciliwung pada musim penghujan

Hal ini terlihat pada TBS-1 dimana pada jarak 98 m dari sungai Ciliwung, konsentrasi ²²²Rn tetap tinggi yakni 1545,75 Bq/m³. Nilai ini sedikit lebih tinggi dibandingkan pengukuran pada musim kemarau sebesar 1226 Bq/m³. Tingkat kedalaman sumur pada TBS-1 yang mencapai 40 m tampaknya belum terpengaruh oleh infiltrasi air permukaan baik dari air hujan maupun dari air sungai. Sebaliknya, pada jarak yang lebih jauh dari sungai Ciliwung yakni pada TBS-2 dan TBS-4 (berturut-turut berjarak 140 m dan 116 m dari sungai) menunjukkan konsentrasi ²²²Rn yang lebih rendah dari pengukuran di TBS-1. Ini menunjukkan bahwa infiltrasi air hujan telah berpengaruh pada air sumur dengan tingkat kedalaman sekitar 12 m. Karena jarak kedua sumur yang cukup jauh dari sungai maka kemungkinan infiltrasi air hujan lebih dominan berpengaruh daripada infiltrasi air sungai.

KESIMPULAN

Melalui penelitian ini, radioisotop ²²²Rn dapat diterapkan untuk mengetahui interaksi air sungai Ciliwung terhadap air tanah dangkal. Pada musim kemarau tampak bahwa semakin mendekati sungai, konsentrasi ²²²Rn pada air tanah mengalami penurunan. Sebaliknya, pada musim penghujan pengaruh jarak air tanah dari sungai terhadap konsentrasi ²²²Rn tidak beraturan. Konsentrasi ²²²Rn air sungai Ciliwung pada musim kemarau maupun penghujan sangat rendah (²²²Rn=0 Bq/m³).

Kisaran konsentrasi ^{222}Rn air tanah dangkal pada musim kemarau adalah antara 666 - 2590 Bq/m³ sedangkan pada musim penghujan berkisar antara 440 - 1546 Bq/m³. Pada musim kemarau kesetimbangan antara air tanah dengan air sungai tercapai pada jarak 98-140 m dari sungai. Berdasarkan pengukuran ^{222}Rn pada air tanah terdekat dengan sungai dan pada daerah kesetimbangan, diperoleh waktu tinggal air tanah di dalam akuifer adalah 4,2 hari. Kecepatan infiltrasi air sungai ke air tanah diperkirakan adalah 7,8 m/hari.

DAFTAR PUSTAKA

- Ali B.H., Blunden G., Tanira M.O., and Nemmar A. 2008. Some phytochemical, pharmacological and toxicological properties of ginger (*Zingiber officinale* Roscoe): A review of recent research. *Food Chem. Toxicol.* 46(2): 409–420.
- Bhal, S. K. 2019. Application Note Lipophilicity Descriptors: Understanding When to Use Log P & Log D Application of Lipophilicity Descriptors in Drug. *Adv. Chem. Dev.* 3–6.
- Black C. D., Herring M. P., Hurley D. J., and O'Connor P. J. 2010. Ginger (*Zingiber officinale*) reduces muscle pain caused by eccentric exercise. *J. Pain.* 11(9): 894–903.
- Fajrin F. A., Nugroho A. E., Nurrochmad, A. and Susilowati R. 2018. Molecular docking analysis of ginger active compound on transient receptor potential cation channel subfamily V member 1 (TRPV1). *Indones. J. Chem.* 18(1): 179–185.
- Gaire B.P., Kwon O.W., Park S.H., Chun K-H., Kim S.Y., Shin D.Y., Choi J.W. 2015. Neuroprotective effect of 6-paradol in focal cerebral ischemia involves the attenuation of neuroinflammatory responses in activated microglia. *Plos One.* 10(3): 1–17.
- Gram, Dorte X., Hansen, Anker J., Deacon, Carolyn F., Brand, Christian L., Ribel, Ulla, Wilken, Michael, Carr, Richard D., Svendsen, Ove, and Ahrén, Bo. 2005. Sensory nerve desensitization by resiniferatoxin improves glucose tolerance and increases insulin secretion in Zucker Diabetic Fatty rats and is associated with reduced plasma activity of dipeptidyl peptidase IV. *Eur. J. Pharmacol.* 509 (2–3): 211–217.
- Haghighi M., Khalvat A., Toliat T., and Jallaei S. 2005. Comparing The Effects Of Ginger (*Zingiber officinale*) Extract And Ibuprofen On Patients With Osteoarthritis. *Arch Iran. Med.* 8(4): 267–271.
- Hutapea F. S., Kembuan, Mieke A. H. N., and P.S., Junita Maja. 2016. Gambaran klinis neuropati pada pasien diabetes melitus di Poliklinik Neurologi RSUP Prof. Dr. R. D. Kandou periode Juli 2014 – Juni 2015. *e-Clinic.* 4(1).
- Jo, S.K., Kim, I.S., Rehman, S.U., Ha, S.K., Park, H.Y., Park, Y.K., Yoo, H.H. 2016. Characterization of metabolites produced from the biotransformation of 6-shogaol formed by *Aspergillus niger*. *Eur. Food Res. Technol.* 242(1): 137–142.
- Kano M., Ohno-Shosaku T., Hashimoto-dani Y., Uchigashima M., and Watanabe M. 2009. Endocannabinoid-mediated control of synaptic transmission. *Physiol. Rev.* 89(1): 309–380.
- Keum, Y.S., Kim, J., Lee, K.H., Park, K.K., Surh, Y.J., Lee, J.M., Lee, S.S., Yoon, J.H., Joo, S.Y., Cha, I.H., Yook, J.I. 2002. Induction of apoptosis and caspase-3 activation by chemopreventive [6]-paradol and structurally related compounds in KB cells. *Cancer Lett.* 177(1): 41–47.
- Mantiri N.C., Awaloei H., and Posangi J. 2013. Perbandingan Efek Analgesik Perasan Rimpang Jahe Merah (*Zingiber officinale* var. *rubrum* Thelaide) Dengan Aspirin Dosis Terapi Pada Mencit (*Mus musculus*). *J. e-Biomedik.* 1(1): 518–523.
- Nurtjahja-Tjendraputra E., Ammit A. J., Roufogalis B. D., Tran V. H., and Duke C. C. 2003. Effective anti-platelet and COX-1 enzyme inhibitors from pungent constituents of ginger. *Thromb. Res.* 111(4–5): 259–265.
- Pabbidi R. M., Yu S. Q., Peng S., Khardori R., Pauza M. E., and Premkumar L. S. 2008. Influence of TRPV1 on diabetes-induced alterations in thermal pain sensitivity. *Mol. Pain.* 4: 1–17.
- Puspaningtyas A. R. 2012. Molekular Docking dengan Metode Molegro Virtual Docker Turunan Kalkon sebagai Antimikroba. *Stomatognatic (J.K.G Unej).* 9(1): 39-47.
- Smith H. S. and Argoff C. E. 2013. Pharmacological treatment of neuropathic pain. *Pain Int. Res. Pain Manag.* 71(5): 203–226.
- Su, K., Wook, D., Soo, Y., Seop, M., Park, S., Choi, S., Pearce, L.V. Blumberg, P.M., Lee, J. 2011. Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters Receptor activity and

- conformational analysis of 5-O-halogenated resiniferatoxin analogs as TRPV1 ligands. *Bioorg. Med. Chem. Lett.* 21(1): 299–302.
- Suhud, F. 2015. Uji aktivitas in-silico senyawa baru 1-benzil-3-benzoilurea induk dan tersubstitusi sebagai agen antiproliferatif. *Jurnal Farmasi Indonesia.* 7(4):242–251.
- Suri A. and Szallasi A. 2008. The emerging role of TRPV1 in diabetes and obesity. *Trends Pharmacol. Sci.* 29(1): 29–36.
- Wahyuliati T. 2006. Antidepresan pada nyeri neuropati diabetik. *Mutiara Medika.* 6(1): 33–41.
- Wei, C.K, Tsai, Y.H., Korinek, M., Hung, P.H., El-Shazly, M., Cheng, Y.B., Wu, Y.C., Hsieh, T.J., Chang, F.R. 2017. 6-Paradol and 6-Shogaol, the Pungent Compounds of Ginger, Promote Glucose Utilization in Adipocytes and Myotubes, and 6-Paradol Reduces Blood Glucose in High-Fat Diet-Fed Mice. *Int. J. Mol. Sci.* 18(1): 1–18.

