



**STUDI ANALISA DAN POLA PERSEBARAN RADIOAKTIVITAS
PERAIRAN DAN SEDIMEN
(STUDI KASUS: SUNGAI CODE YOGYAKARTA)**

Badrus Zaman^{*)}, Agus Taftazani^{*)}, Rr. Pasca Sri Retnaningrum^{*)}

ABSTRACT

The around area in the river of Code Yogyakarta represent area which have the potency to yield waste in the form of radioactive waste which can enable the happening of radioactive contamination. This research done as a mean to identify radionuclide which implied in water and sediment samples in the river of Code Yogyakarta, knowing data of concentration (activity of average) of radionuclide which identified to transmit betha (β) and gamma (γ) radiation in territorial water of river Code Yogyakarta and their distribution pattern with estimate of source, and also comparing concentration (activity of average) of radionuclide transmitting betha (β) and gamma (γ) radiation that implied in water and sediment of river Code Yogyakarta with permanently quality of PPRI No. 82/2001 and SK Gubernur DIY No. 214/KPTS/1991. The sampel used by river water and sediment which is there in eleven (11) station of river Code, Yogyakarta. This water and sediment samples taken at dry season (August 2005). The result of this research got the activity of average of radionuclide transmitting betha (β) radiation at water sample is still below/under value float according to PPRI No. 82/2001 and SK Gubernur DIY No. 214/KPTS/1991 (equal to 1 Bq/L). Others, element of radionuclide which have been identified at this research represent group of nature radionuclide (^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{208}Tl , ^{214}Bi , ^{228}Ac , and ^{40}K). Inferential thereby that the environmental quality condition of river Code Yogyakarta from radioekology aspect is still be good.

Keywords : radioactivity, distribution, betha (β), gamma (γ), radionuclide, river Code Yogyakarta

PENDAHULUAN

Pada perairan sungai biasanya terdapat radionuklida yang berasal dari jatuhan debu radioaktif ataupun dari alam (batuan) dengan konsentrasi yang sangat rendah atau kecil. Di samping itu

dimungkinkan pula adanya tambahan radioaktif yang berasal dari radionuklida buangan industri (seperti: industri plat logam, kertas, plastik, tekstil, kertas, pertambangan, pupuk tanaman, dan lain-lain) yang hanyut terbawa air (Wardhana, 1994). Demikian halnya

^{*)} Jurusan Teknik Lingkungan FT. UNDIP
Jl. Prof. Soedarto SH, Tembalang Semarang

dengan sungai Code Yogyakarta, unsur radioaktif yang mungkin terdeteksi diperkirakan dapat berasal dari limbah industri serta limbah rumah sakit yang berada di sekitar sungai ini. Unsur radioaktif dapat masuk ke dalam ekosistem air sungai melalui udara atau terbawa oleh air permukaan.

Sedangkan penyebarannya dalam bentuk partikel atau padatan akan mengendap di dasar sungai (Uktolseya, 1991 dalam Utami, 2005).

Untuk mengetahui kualitas lingkungan sungai Code Yogyakarta dari aspek radioekologi, maka perlu dilakukan kajian radioaktivitas pada lingkungan perairan sungai tersebut yang meliputi konsentrasi/aktivitas rerata (*gross*), dan identifikasi radionuklida.

AIR DAN SEDIMEN SUNGAI

Air sungai merupakan air yang mengalir dari hulu ke hilir yang biasanya berupa aliran air dari mata air, limpasan air hujan maupun dari penambahan buangan air domestik atau industri. Pembuangan limbah ke sungai akan membuat ekosistem sungai menjadi tercemar. Selain itu, unsur radioaktif yang terlarut dalam air akan menyebabkan terkontaminasinya ekosistem tersebut.

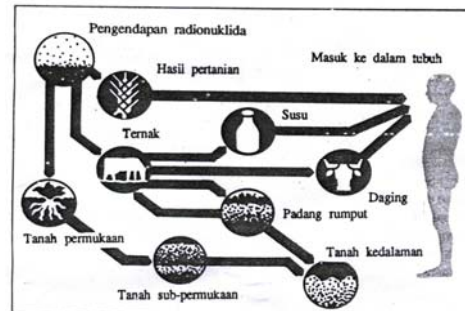
Sedimen adalah padatan yang dapat langsung mengendap jika air dibiarkan tidak terganggu selama beberapa waktu. Padatan yang mengendap tersebut terdiri dari partikel-partikel padatan yang mempunyai ukuran relatif besar dan berat sehingga dapat mengendap dengan sendirinya. Begitu juga dengan unsur radioaktif dalam sistem perairan dapat mengendap di dasar sungai.

PENCEMARAN RADIOAKTIVITAS LINGKUNGAN

Pencemaran radioaktivitas lingkungan, baik yang melalui udara maupun air, pada akhirnya akan dapat mencemari manusia. Menurut Wardhana (1994) untuk dapat mengetahui masalah pencemaran radioaktivitas lingkungan terlebih dahulu harus diketahui kemungkinan sumber-sumber pencemaran radioaktivitas lingkungan, yang antara lain dapat berasal dari:

- Penambangan, Pengolahan dan Proses Kimia Bahan Nuklir
- Proses Pengkayaan dan *Fabrikasi* Bahan Bakar Nuklir
- Operasi Reaktor Nuklir
- Reprocessing* Bahan Bakar
- Pengelolaan Limbah Radioaktif
- Proses Pembuatan Radionuklida
- Penggunaan Radioisotop di Bidang Riset, Industri dan Kedokteran
- Proses Dekontaminasi dan *Dekomisioning* suatu Fasilitas Nuklir
- Akselerator
- Pemakaian Bahan Bakar Fosil
- Percobaan dan Ledakan Bom Atom

Proses masuknya zat radioaktif ke dalam tubuh dapat dilihat pada Gambar 1 berikut ini :



Gambar 1 Proses masuknya zat radioaktif ke dalam tubuh
(Sumber: UNEP dalam Akhadi, 2003)

METODOLOGI

Sampel diambil dari sebelas (11) stasiun sebanyak 10 liter/stasiun. Sampel air diambil dari kedalaman $\pm 1/2$ sampai $2/3$ tinggi penampang basah dari bawah permukaan air. Sampel sedimen diambil dari perairan sebanyak 2 kg/lokasi, dibuang airnya dan dimasukkan kedalam plastik klip yang sudah diberi label lokasi pengambilan sampel.

Preparasi terhadap sampel air sungai untuk cacah betha (β) adalah air diambil sebanyak 2 liter kemudian dipekatkan sampai volume 10 ml dengan kompor listrik. Residu yang telah dihasilkan kemudian diteteskan ke dalam planset yang telah diberi label, kemudian dipanaskan di bawah lampu pijar 500 Watt, sehingga diperoleh sampel kering homogen serta permukaan sampel rata. Sampel air sungai kemudian siap untuk dicacah dengan LBC (*Low Background Counter*) Geiger Muller selama 20 menit setelah sebelumnya dilakukan kalibrasi terlebih dahulu.

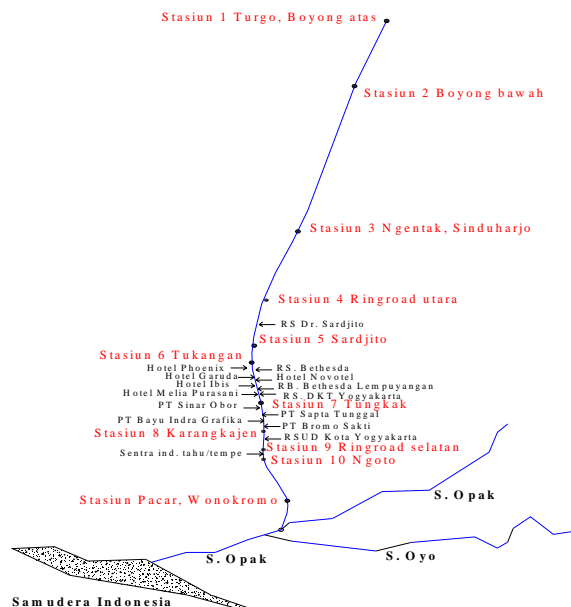
Sedangkan perlakuan untuk preparasi sampel air sungai cacah gamma (γ) adalah air diambil sebanyak 1 liter kemudian dipekatkan sampai volume 20 ml dengan kompor listrik. Residu yang telah dihasilkan kemudian ditempatkan pada wadah plastik tertutup yang telah diberi label. Setelah dilakukan kalibrasi spektrometer, maka sampel air sungai kemudian siap untuk dicacah dengan LBC (*Low Background Counter*) detektor gamma HPGe selama 7200 detik.

Sedangkan preparasi sampel sedimen dilakukan dengan membersihkan sedimen dari pengotor. Setelah itu dikeringkan pada suhu ruangan selama kurang lebih 14 hari. Sedimen yang telah kering ditumbuk halus hingga lolos dalam ayakan 100 mesh, dan dihomogenkan. Serbuk yang dihasilkan dimasukkan ke dalam plastik klip yang telah diberi label yang berbeda untuk setiap lokasi.

Preparasi terhadap sampel sedimen untuk cacah betha (β) adalah serbuk sedimen yang telah dihaluskan dan diayak tersebut ditimbang sebanyak 1 gram dan ditempatkan pada planset yang telah diberi label. Kemudian dilakukan seperti pada air. Preparasi terhadap sampel sedimen untuk cacah gamma (γ) adalah serbuk sedimen yang telah dihaluskan dan diayak tersebut ditimbang sebanyak 100 gram dan ditempatkan pada wadah plastik tertutup yang telah diberi label. Kemudian dilakukan seperti pada air.

Berdasarkan data dari analisa laboratorium dan hasil pencatatan pengamatan langsung di lapangan (seperti: suhu, pH, kedalaman, arus) serta data-data sekunder dari masing-masing lokasi sampling, maka pola sebaran polutan radioaktif sepanjang daerah penelitian akan didapatkan dengan menggunakan *software* Surfer7.0. Lokasi sampling dapat dilihat pada Gambar 2 berikut ini :

Sketsa Lokasi Sumber Pencemar dan Titik Sampling Sungai Code



Gambar 2. Lokasi Sampling

HASIL DAN PEMBAHASAN

Besarnya aktivitas (konsentrasi rerata) gross betha (β) dalam sampel air dan sedimen sungai Code Yogyakarta disajikan pada Tabel 1.

Radionuklida yang teridentifikasi pada sampel air dan sedimen sungai Code Yogyakarta adalah radionuklida alam yang meliputi: ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{208}Tl , ^{214}Bi , ^{228}Ac , dan ^{40}K . Pola Sebarannya setelah diolah dengan Surfer 7.0 adalah sebagai berikut :

Tabel 1. Hasil Pengukuran Aktivitas Rerata Betha (β) pada Sampel Air dan Sedimen

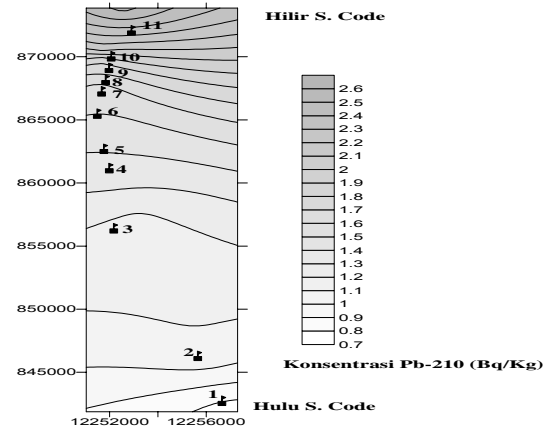
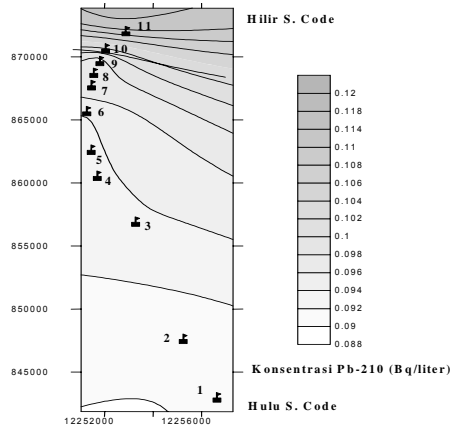
Lokasi	Aktivitas Betha	
	Sampel Air (Bq/liter)	Sampel Sedimen (Bq/kg)
Hulu :		
I	0.079	290.084
II	0.080	292.722
III	0.100	295.359
Rata-rata	0.086	292.722
Tengah :		
IV	0.150	300.633
V	0.153	313.819
VI	0.156	324.367
VII	0.169	342.827
VIII	0.200	345.464
Rata-rata	0.175	337.553
Hilir :		
IX	0.219	366.561
X	0.235	374.473
XI	0.237	414.030
Rata-rata	0.230	385.021

Sumber : Hasil perhitungan data, 2005

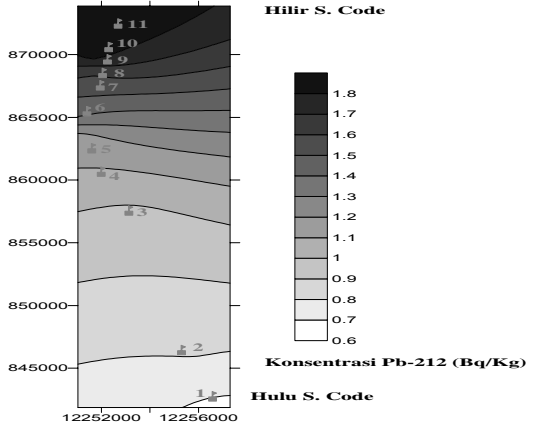
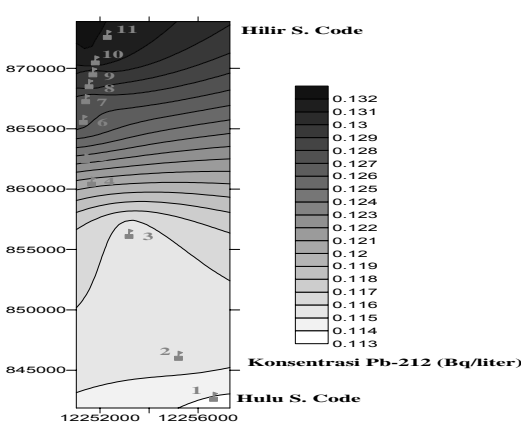
Dalam Air

- ^{210}Pb

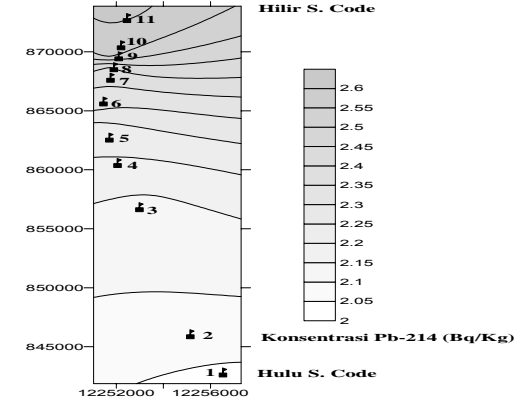
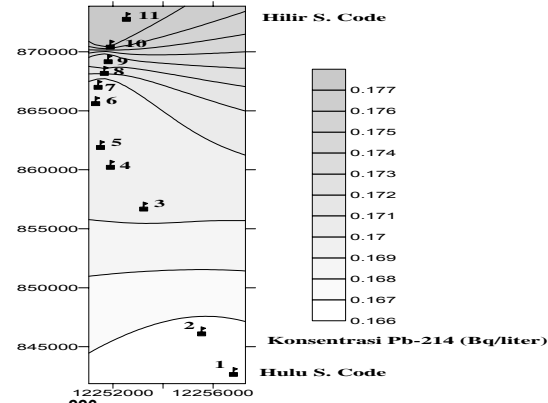
Dalam Sedimen



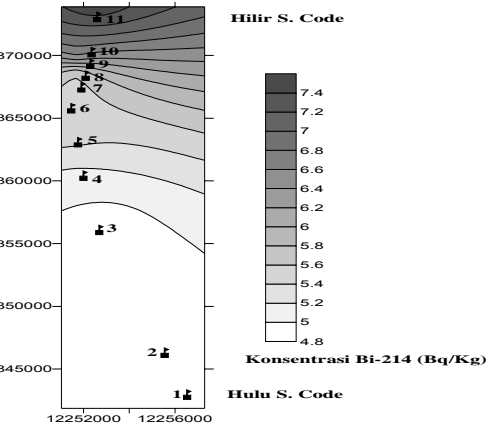
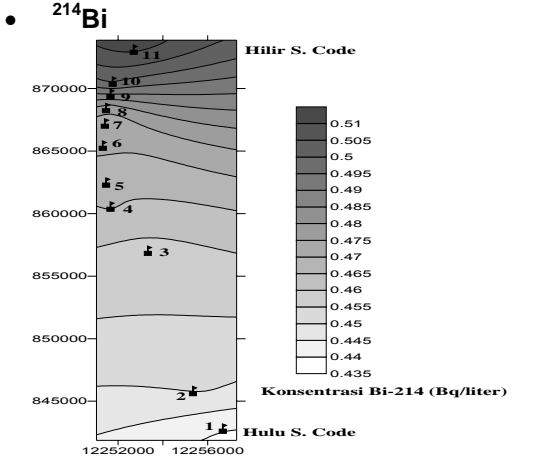
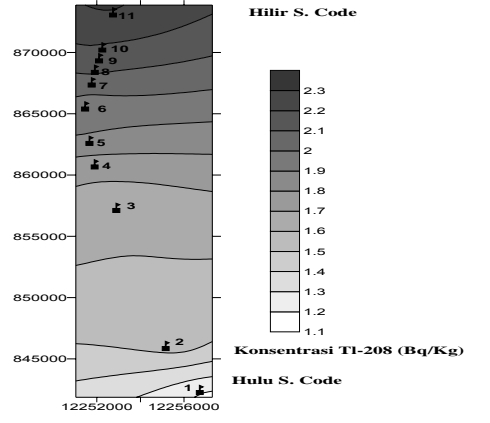
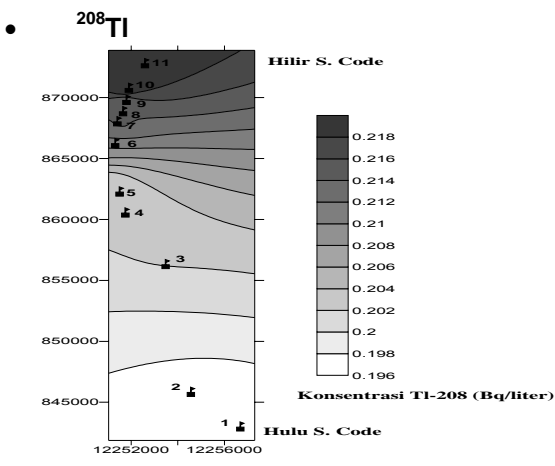
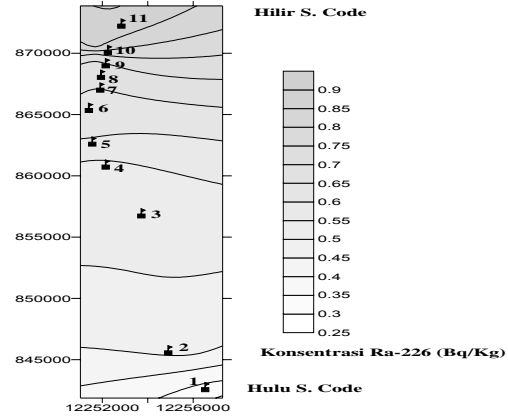
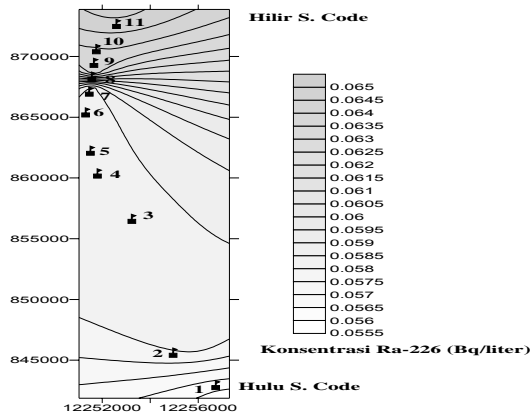
● **²¹²Pb**



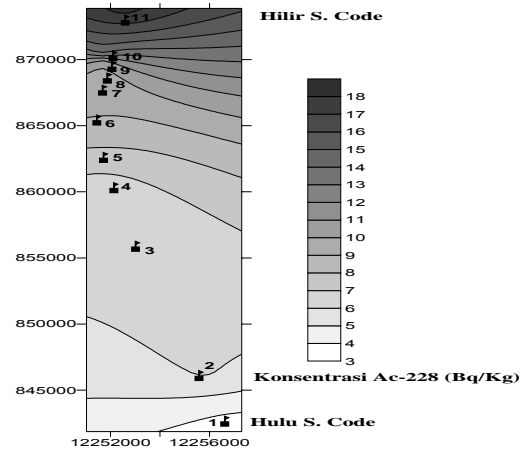
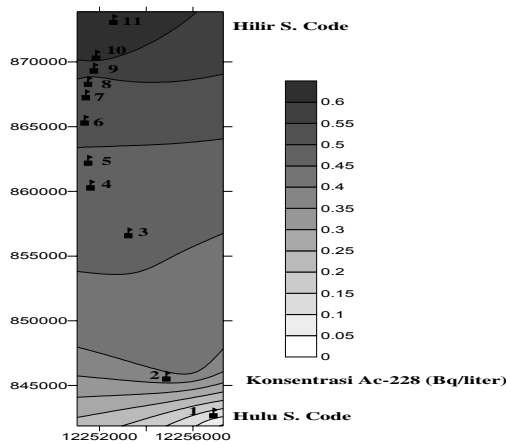
● **²¹⁴Pb**



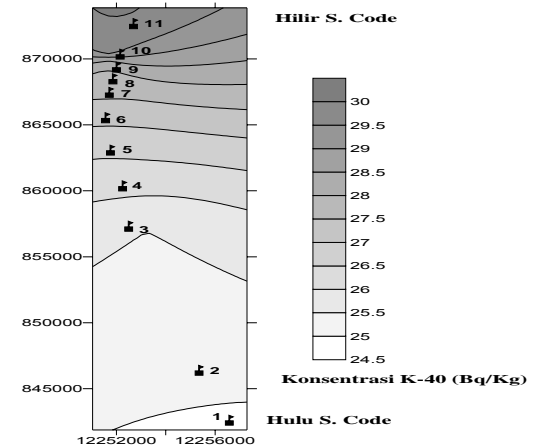
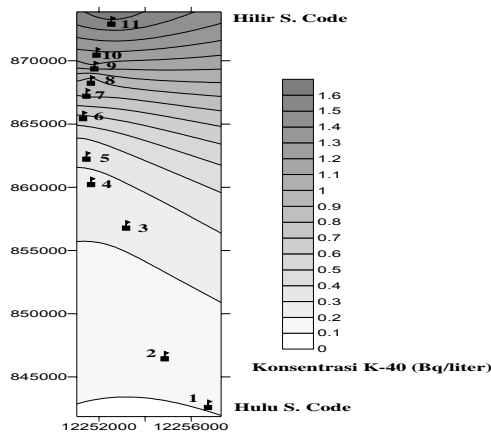
● **²²⁶Ra**



● **²²⁸Ac**



● ⁴⁰K



Berdasarkan tabel 1, 2, dan gambar-gambar pola persebaran radionuklida pada air dan sedimen, serta hasil analisa statistik

dengan uji hipotesa, maka dapat diketahui bahwa konsentrasi/ rerata radioaktivitas gross betha (β) dan gamma (γ) yang telah terdeteksi dalam sampel air dan sedimen sungai Code mengalami peningkatan dari daerah hulu ke daerah hilir. Sebagai contoh, terjadinya peningkatan aktivitas betha (β) dalam sampel air yang cukup besar

dari daerah hulu ke daerah tengah sungai Code yakni sebesar $\pm 103,48\%$. Hal ini diduga terjadi karena adanya aktivitas kehidupan yang lebih beragam di sekitar wilayah tengah sungai Code jika dibandingkan dengan daerah hulu, seperti terdapatnya 4 buah rumah sakit, 6 buah hotel, dan 4 buah pabrik di sekitar wilayah tengah sungai Code yang diperkirakan membuang limbahnya ke lokasi ini.

Hal ini sesuai dengan pendapat Wardhana (2001) bahwa semakin ke

hilir sungai maka kadar pencemaran semakin meningkat, yang disebabkan karena lebih banyak dan beragamnya aktivitas kehidupan yang dilakukan di daerah hilir jika dibandingkan dengan di daerah hulu yang relatif masih bersih dan jauh dari pencemaran. Adapun distribusi pencemaran radioaktivitas gross (β) dan gamma (γ) ini juga di pengaruhi oleh arah aliran sungai, yang secara gravitasi membawa bahan-bahan pencemar radioaktivitas gross (β) dan gamma (γ) dari daerah hulu hingga daerah hilir sungai Code. Sebagai contoh terjadinya peningkatan aktivitas betha (β) dalam sampel air dari daerah tengah ke daerah hilir sungai Code yakni sebesar $\pm 31,43\%$. Terjadinya peningkatan konsentrasi ini diduga karena arah aliran sungai pada daerah hilir sungai Code tersebut mendapat limpasan bahan pencemar radioaktivitas gross betha (β) dari daerah tengah sungai Code yang diperkirakan telah membawa bahan pencemar radioaktivitas gross betha (β) dari kawasan industri (industri kertas, tekstil, mesin), dan kesehatan (rumah sakit). Aktivitas betha (β) dan gamma (γ) yang terlarut dalam air dan sedimen penyebarannya dipengaruhi pula oleh kecepatan arus. Debit air sungai dan kecepatan arus daerah hulu yang masih cukup kecil menyebabkan unsur radionuklida akan semakin banyak mengendap pada sedimen di lokasi tersebut. Hal ini terlihat pula pada perhitungan faktor distribusi radionuklida dari air ke sedimen sungai Code yang menunjukkan bahwa nilai faktor distribusi di daerah hulu lebih besar daripada daerah hilir sehingga membuktikan bahwa banyak terjadi pengendapan di daerah hulu. Menurut Alaerts dan Santika (1984), kecepatan arus mempengaruhi distribusi

pencemaran radioaktivitas sehingga tersebar luas ke lingkungan karena menyebabkan pergerakan massa air yang memungkinkan terjadinya penyebaran radioaktivitas walaupun sumbernya jauh dari tempat tersebut. Peristiwa turbulensi (tergerusnya) sedimen/endapan di dasar sungai terjadi akibat pergerakan arus yang kuat. Turbulensi tersebut mengakibatkan terbawanya sedimen/endapan oleh aliran ke daerah hilir. Demikian pula halnya dengan sungai Code, adanya kecepatan arus yang besar di stasiun 8 (daerah tengah sungai Code) mengakibatkan pada daerah hilir sungai Code dapat dimungkinkan terjadinya pencampuran atau akumulasi endapan hasil buangan dari berbagai kegiatan yang ada di daerah hulu dan tengah sungai Code (seperti: industri, pemukiman/rumah tangga, fasilitas-fasilitas kesehatan dan pariwisata/perhotelan, dan lain sebagainya). Limbah yang dibuang ke dalam sungai di daerah tengah ini diperkirakan mengandung lumpur yang kemudian tercampur dengan endapan yang berada di daerah hilir sehingga membentuk sedimen yang kemudian mengendap di dasar hilir sungai Code. Selanjutnya menurut Alaerts dan Santika (1984), konsentrasi radioaktivitas (aktivitas rerata) gross betha (β) dan gamma (γ) yang terlarut dalam air juga dipengaruhi oleh musim. Adanya perbedaan musim berpengaruh terhadap konsentrasi radioaktivitas. Penelitian ini dilakukan pada musim kemarau, sehingga kandungan radioaktivitas gross betha (β) dan gamma (γ) akan lebih tinggi pada musim kemarau apabila dibandingkan dengan musim hujan. Hal ini dikarenakan pada musim hujan terjadi pengenceran dalam sungai karena

kenaikan debit yang lebih besar sedangkan pada musim kemarau kandungan radioaktivitas gross betha (β) dan gamma (γ) akan tinggi karena terkonsentrasi. Selain dari buangan industri di sekitarnya, radioaktivitas gross betha (β) dan gamma (γ) pada cuplikan air dan sedimen sungai juga dapat berasal dari alam (dari ruang angkasa dalam bentuk radiasi kosmis maupun dari permukaan bumi, udara, batuan, dan lain-lain). Sebagai contoh, debu dan asap yang dihasilkan dari aktivitas penduduk dan berakibat terjadinya polusi udara, akan disebarkan melalui udara dan bercampur dengan unsur-unsur radioaktif, kemudian bahan-bahan pencemar yang mengandung partikel betha (β) ataupun gamma (γ) jatuh dari atmosfer, bersama hujan masuk ke dalam sungai dan terlarut di dalamnya (Thayib, 1985). Hal ini juga terlihat dari hasil identifikasi unsur radionuklida (menggunakan spektrometer gamma) di perairan sungai Code, yang ternyata menunjukkan radionuklida alamiah yang dominan di perairan tersebut. Dengan demikian telah sesuai dengan pernyataan Akhadi (2003) bahwa dalam kondisi normal, radiasi alam mempunyai kontribusi terbesar dalam jumlah dosis yang diterima lingkungan setiap saat. Adapun keberadaan radionuklida di perairan sungai Code ini diperkirakan berasal dari batuan (material) letusan gunung merapi yang tersebar di sepanjang sungai Code ataupun dari aktivitas penduduk yang menyebabkan terjadinya polusi udara (misal : asap kendaraan bermotor, limbah industri, limbah domestik, dan lain sebagainya). Dari hasil perhitungan konsentrasi/aktivitas betha (β) dan gamma (γ) dalam sampel air dan sedimen sungai Code, didapatkan

bahwa konsentrasi/aktivitas dalam sampel sedimen sungai Code lebih tinggi daripada sampel air. Hal ini sesuai dengan pendapat Taftazani dalam Utami (2005) dan Palar (2004), yang menyatakan bahwa secara normal konsentrasi radionuklida di sedimen lebih tinggi bila dibandingkan dengan perairannya, disamping karena keberadaan unsur radioaktif tersebut secara alami terkonsentrasi dalam batuan dan sedimen, juga karena sifat sedimen yang lebih stabil dan susunan partikel sedimen yang lebih rapat sehingga cenderung menangkap unsur radioaktif yang masuk ke dalam perairan. Adapun hasil dari analisa statistik dengan uji regresi, didapatkan bahwa ternyata model regresi tidak dapat menjelaskan pengaruh debit terhadap konsentrasi (aktivitas rerata) radionuklida pemancar betha (β) ataupun gamma (γ) yang telah terdeteksi. Maksudnya besar kecilnya debit pada tiap-tiap lokasi tidak mempengaruhi secara signifikan terhadap peningkatan konsentrasi (aktivitas rerata) radionuklida yang telah terdeteksi dari satu lokasi ke lokasi yang lain. Nilai R square juga cukup kecil berarti hubungan kedua variabel sangat lemah. Hanya sebagian kecil saja mempengaruhi dan sebagian besar dipengaruhi oleh sebab lain seperti kecepatan aliran sungai, letak geografis dan keadaan geologi tempat tersebut, keadaan tanah, batuan, dan pasir, proses pencampuran, persebaran, serta interaksi dengan sedimen atau material biologis (Taftazani, dkk., 1998 dan Wardhana, 1994). Namun demikian, nilai paparan radioaktivitas dari tiap unsur radionuklida alam yang diukur dari sampel air maupun sedimen sungai Code tidak dapat dijadikan ukuran

untuk menentukan kondisi perairan tersebut melebihi ambang batas ataupun tidak, karena belum ada baku mutu untuk tiap unsur tersebut. Sementara baku mutu yang ada saat ini merupakan baku mutu untuk paparan gross alfa (α) dan betha (β) secara kumulatif (bukan tiap unsur).

SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, maka dapat diambil kesimpulan :

1. Radionuklida yang teridentifikasi pada sampel air dan sedimen sungai Code Yogyakarta adalah radionuklida alam yang meliputi: ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{212}Pb , ^{214}Pb , ^{208}Tl , ^{214}Bi , ^{228}Ac , dan ^{40}K . dengan konsentrasi dalam sampel air dan sedimen sungai Code meningkat dari daerah hulu ke daerah hilir
2. Konsentrasi (rerata radioaktivitas) gross betha (β) yang diukur dari sampel air sungai Code Yogyakarta masih berada di bawah nilai ambang batas radioaktivitas menurut Peraturan Pemerintah No. 82/2001 dan SK Gubernur DIY No. 214/KPTS/1991 (1 Bq/liter). Dengan demikian dapat dikatakan bahwa kondisi kualitas lingkungan perairan sungai Code Yogyakarta dari aspek radioekologis adalah masih relatif baik dan aman.

DAFTAR PUSTAKA

Akhadi, Mukhlis. 2002. *Mengenal Risiko Radio Ekologis Bahan Asbes*.<http://www.tempointeraktif.com/medika/arsip/052002/top-1.htm> -

Akhadi, Mukhlis. 2003. *Pengantar Teknologi Nuklir*. Penerbit Rineka Cipta: Jakarta.

Alaerts, Santika. 1984. *Metoda Penelitian Air*. Penerbit: Usaha Nasional: Surabaya

Beiser, A. 1987. *Konsep Fisika Modern*; Alih Bahasa The Houw Liong. Edisi Keempat. Penerbit Erlangga: Jakarta.

Beiser, A. 1987. *Konsep Fisika Modern*; Alih Bahasa The Houw Liong. Edisi Keempat. Penerbit Erlangga: Jakarta.

Montgomery, C.W. 2003. *Environmental Geology*. Sixth Edition. McGraw-Hill Companies, Inc: New York.

Palar, H. 2004. *Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat*. Rineka Cipta: Jakarta

Permana, Dedi. 2001. *Intisari Kimia*. Pustaka Setia: Bandung.

Pettijohn, F.J. 1975. *Sedimentary Rocks*. Second Edition. Harper and Row Publiser: New York.

Purba, Agustinus N, H. 2001. *Pengukuran Radioaktivitas Alpha dan Betha dan Identifikasi Radionuklida Dalam Sampel Sedimen, Eceng Gondok di Air Sungai Kenjeran dan Morokrengan Surabaya*. Skripsi Sekolah Tinggi Teknik Lingkungan (STTL): Yogyakarta.

Pusat Kesehatan Kerja. 2005. *Ada Radiasi di sekitar kita!*. <http://www.depkes.go.id>

Sebastian, Ryan. 2005. *Kepedulian*. Kompas.

- http://ryan.blog.m3access.com/post/s/cat_517_Kesehatan.html
- Sukendar dan Farida. 2005. *Ancaman Logam Maut dari Jalanan*. Gatra. http://www.gatra.com/versi_cetak.php?id
- Suratman. 1997. *Pengukuran Radioaktivitas Beta*. Pusat Penelitian Nuklir BATAN: Yogyakarta.
- Suratman. 2001. *Introduksi Proteksi Radiasi Bagi Siswa/Mahasiswa Praktek*. Pusat Penelitian Nuklir BATAN: Yogyakarta.
- Sumining, Agus Taftazani. 1999. *Radioaktivitas Lingkungan Perairan Sekitar Muria*. Prosiding Pertemuan dan Prosentasi Ilmiah Litdas Iptek Nuklir PPNY-BATAN Yogyakarta 14-15 Juli 1999. ISSN 02163128. BATAN: Yogyakarta
- Susetyo, W. 1988. *Spektrometri Gamma dan Penerapannya dalam Analisis Pengaktifan neutron*. Gadjah Mada University Press: Yogyakarta.
- Taftazani Agus. 2004. *Petunjuk Praktikum (sampling, preparasi, analisis dengan spektrometer gamma)*. BATAN: Yogyakarta.
- Taftazani Agus, Sasongko P. Dwi, Tri Basuki Kris. 1997. *Radioaktivitas Lingkungan Pesisir Laut Semarang*. Prosiding Temu Ilmiah Jaringan Kerjasama Kimia Indonesia dan Lingkungan. BATAN: Yogyakarta.
- Taftazani Agus, Suhardi, Wahyuningsih, Suharini. 2003. *Penentuan Aktivitas β -Total pada berbagai cuplikan kerang*, Prosiding PPI Pranata Nuklir. BATAN: Yogyakarta.
- Tamzil, HM. 2006. *Gerakan Kultural Kebijakan Lingkungan*. <http://www.infonuklir.com/Kamus/b.htm>
- Triatmodjo, B. 1999. *Teknik Pantai*. Beta Offset: Yogyakarta.
- Utami, R.N. 2005. *Distribusi Pencemaran Radioaktivitas gross β dan Identifikasi Radionuklida Alam Dalam Cuplikan Air, Sedimen, dan Biota di Perairan Surabaya*. Laporan Tugas Akhir Jurusan Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia: Yogyakarta.
- Wardhana, W.A. 1994. *Teknik Analisis Radioaktivitas Lingkungan*. Penerbit ANDI: Yogyakarta.
- Wardhana, W.A. 1996. *Radioekologi*. Edisi Pertama. Penerbit ANDI: Yogyakarta.
- Wardhana, W.A. 2001. *Dampak Pencemaran Lingkungan*. Edisi Revisi. Penerbit ANDI: Yogyakarta.
- Wartunut. 2003. *Estimasi Laju Sedimentasi Berdasarkan Aktivitas ^{210}Pb di Pesisir Semenanjung Muria*. Skripsi Jurusan Fisika – FMIPA Undip: Semarang.
- Wisnubroto, Djarot. 2003. *Studi NORM dan TENORM dari Kegiatan Industri Non Nuklir*. Jurnal Teknologi Pengelolaan Limbah Volume 6 No. 2. P2PLR BATAN: Serpong