

## KONSENTRASI RADIOAKTIVITAS LINGKUNGAN DALAM PARTIKULAT UDARA (*PM10*) DI KAWASAN NUKLIR PASAR JUMAT (KNPJ).

Leons Rixson, Megy Stefanus

Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi, jalan raya Cilandak no.49, Jakarta Selatan  
leons@batan.go.id

### ABSTRAK

KONSENTRASI RADIOAKTIVITAS LINGKUNGAN DALAM PARTIKULAT UDARA (*PM10*) DI KAWASAN NUKLIR PASAR JUMAT (KNPJ). Kajian radioaktivitas udara merupakan salah satu program pemantauan radioaktivitas lingkungan KNPJ. Partikulat Udara *PM10* ditangkap menggunakan kertas saring udara whatman EPM 2000. Konsentrasi massa *PM10* diukur dengan metode gravimetric. Sedangkan, radioaktivitas alfa-beta total menggunakan sistem pencacah *Low Background Counter* (LBC). Sampel dicuplik setiap tiga bulan sekali (triwulan) pada lima belas lokasi dalam periode Juni 2016 sampai dengan Juni 2017. Hasil menunjukkan koefisien korelasi cacahan alfa total terhadap beta total adalah 99.7%, hal ini mengindikasikan bahwa radiasi alfa -beta total adalah berasal dari peluruhan radionuklida alam (U-238 dan Th-232) konsentrasi massa rata-rata *PM10* pada periode triwulan 3 tahun 2016, triwulan 4 tahun 2017, triwulan 1 tahun 2017 dan triwulan 2 tahun 2017 berturut-turut adalah  $124.42 \pm 14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $116.70 \pm 12.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $132.13 \pm 13.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dan  $187.25 \pm 13.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Perubahan konsentrasi radioaktivitas alfa-beta total yang dipengaruhi oleh variabel konsentrasi massa *PM10* berturut-turut sebesar 0.171 dan 0.165. Sementara itu, koefisien korelasi yang didapatkan dari hubungan *PM10* terhadap alfa-beta total adalah 41.47% dan 40.62 %.

Kata Kunci: Radioaktivitas, *Particulate Matter* (*PM10*), *Low Background Counter* (LBC)

### ABSTRACT

*PARTICULATE MATTER (PM10) ENVIRONMENTAL RADIOACTIVITY CONCENTRATION IN PASAR JUMAT NUCLEAR FACILITY (KNPJ). The study of air radioactivity is one of the KNPJ environmental radioactivity monitoring programs. Particulate Matter (PM10) was captured using whatman EPM 2000 air filter. Mass concentration of PM10 measured by gravimetric method. Meanwhile, total alfa-beta radioactivity using Low Background Counter counting system (LBC). Samples were sampled quarterly in fifteen locations in the period from June 2016 to June 2017. The results show coefficient correlations counts between gross alpha and gross beta is 96.5%, indicating that radiation gross alpha-beta is from the natural radionuclide decay (U-238 and Th-232). Average PM10 mass concentrations in third quarter / 2016, fourth quarter/2017, first quarter / 2017 and second quarter of 2017 were  $124 \pm 14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $113.61 \pm 12.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $132.13 \pm 13.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $187.25 \pm 14.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , respectively. Radioactivity gross alfa-beta concentration is influenced by PM10 mass concentration variable of 0.171 and 0.165. Meanwhile, coefficient correlations between PM10 with alfa-beta total is 41.47% dan 40.62 %, respectively*

Keywords: Radioactivity, *Particulate Matter* (*PM10*), *Low Background Counter* (LBC)

### PENDAHULUAN

Pencemaran udara perkotaan pada saat ini merupakan masalah yang pelik dan cenderung semakin meningkat dari waktu ke waktu. Masalah utama pengendalian pencemaran lingkungan udara disebabkan karena pencemaran udara tidak mengenal batas administrasi wilayah. Pencemaran udara di suatu wilayah tidak hanya berasal dari sumber pencemar lokal namun dapat pula berasal dari perjalanan lintas provinsi maupun negara. *Particulate Matter* (*PM*) merupakan salah satu dari 12 parameter pencemar udara yang terdapat di dalam PP No 41 tahun 1999 [1]. *PM* memiliki dampak paling berbahaya bagi kesehatan manusia karena kemampuannya yang dapat masuk sampai ke sistem pernapasan yang paling dalam. *PM* didefinisikan sebagai subdivisi kecil dari material padat tersuspensi dalam gas atau cair. *PM* terjadi akibat emisi langsung ke udara yang disebut partikulat primer dan melalui bentukan sekunder di atmosfer yang berasal dari emisi gas sulfur dioksida, nitrogen oksida, ammonia, dan campuran organik volatile bukan metana yang dihasilkan dari aktivitas kegiatan manusia,

seperti pembangkit listrik, industri, transportasi dan proses alam [2]. *PM10* adalah partikel kasar yang memiliki diameter aerodinamik kurang dari 10  $\mu\text{m}$  yang tersusun atas aluminosilikat dan oksida dari kerak, partikel debu jalan, pertanian, konstruksi, kejadian alam dan abu terbang hasil dari pembakaran bahan fosil seperti batu bara.

Konsentrasi massa *PM* ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) memiliki tingkat radioaktivitas yang berasal dari peluruhan radionuklida alam yang berada di dalam atmosfer. Partikel radionuklida yang melayang dipermukaan atmosfer berasal dari deret uranium (U-232), thorium (Th-232), actinium (U-235), dan K-40 yang mempunyai waktu paruh panjang. Hasil kajian di sekitar PLTU Rembang di Jawa Tengah menunjukkan bahwa identifikasi radionuklida di filter *PM10* adalah Th-234, Ra-226, Pb-212, Tl-208, Pb-214, K-40 hingga Bi-214 [3]. Radiasi yang dipancarkan oleh radionuklida alam tersebut sebagian besar adalah radiasi alfa dan beta. Deret radionuklida U-238 dan Th-232 melalui anak luruh radium Ra-226 dan Th-228 mengalami perubahan fase padat menjadi gas radon (Rn-222) dan thoron (Rn-220). Gas radon selanjutnya menghasilkan 4

(empat) buah elemen radionuklida dengan orde waktu yang sangat cepat berkisar milidetik sampai dengan 27 menit yang diantaranya adalah Pb-214 (26.8 menit), Bi-214 (19.9 menit). Seperti halnya radon, gas thoron menghasilkan anak luruh Pb-212 dan Bi-212 dengan orde waktu paruh 10.64 jam dan 60.55 menit.

Pengukuran Tingkat radioaktivitas udara merupakan bagian dari program pemantauan radioaktivitas lingkungan KNPJ yang bertujuan untuk mengetahui perubahan kualitas lingkungan yang mungkin terjadi akibat pencemaran hasil kegiatan penelitian di Kawasan Nuklir Pasar Jumat. Kajian radioaktivitas udara KNPJ tahun 2012 periode pemantauan bulan Juli s.d Desember 2012 menyatakan konsentrasi alfa-beta total tertinggi berturut-turut adalah  $(8.280 \pm 2.390) \times 10^{-06}$  Bq/l dan  $3.137 \times 10^{-05} \pm 4.841 \times 10^{-06}$  Bq/l [4]. Namun demikian, Kajian tersebut belum melakukan pengukuran konsentrasi massa *PM10* beserta tingkat radioaktivitas didalamnya. Tujuan dari makalah ini adalah untuk mengetahui sebaran konsentrasi massa *PM10* serta mengetahui kontribusi, korelasi dan rasio radioaktivitas alam yang terdapat dalam *PM10*.

## METODOLOGI

### A. Lokasi dan Waktu

Pengambilan sampel debu udara seperti terlihat pada Gambar 1 dilakukan di 15 lokasi yang mengikuti pola lingkaran dalam radius 100, 200 dan 300 meter dengan Iradiator Karet Alam (IRKA) PAIR – BATAN sebagai titik pusatnya, berdasarkan dokumen Rencana Pengelolaan dan Pemantauan Lingkungan, PATIR-BATAN, Jakarta, 1993 [5]. Waktu pelaksanaan kegiatan pengambilan sampel dan analisa adalah dari bulan Juli 2016 sampai dengan Juni 2017.

### B. Alat Dan Bahan

- Kertas Saring EPM 2000
- *Global Positioning System* (GPS)
- *descicator*
- *Air Sampler Radeco H-810 DC*
- *Tripod*
- Sistem pencacah *Low Background Counting (LBC) iMatic*
- Neraca analitik dengan ketelitian 4 digit



Gambar 1. Peta pemantauan pengambilan sampel *PM10*

**C. Sampling dan Pengukuran**

Partikulat udara ditangkap dengan kertas saring *whatman EPM 2000* yang terpasang pada alat pencuplik debu udara *radeco H-810 DC*. *EPM 2000* mempunyai spesifikasi besar ukuran pori 2.0 μm dengan diameter 47 mm. setelah pencuplikan kertas saring di ukur dengan LBC selama 60 menit untuk lalu dihitung radioaktivitas alfa-beta total melalui persamaan 1.

$$T_{ru} = \frac{(1/2)^{\frac{t}{T_{1/2}}} \times R_{sp} - R_{bg}}{\eta_f \times \eta_p \times V} \dots (1)$$

dengan:

- $T_{ru}$  : Tingkat Radioaktivitas Udara (Bq/m<sup>3</sup>)
- $t$  : selang waktu selesai *sampling* sampai saat mulai pancacah
- $T_{1/2}$  : waktu paruh partikulat
- $R_{sp}$  : Cacah sampel (CPS)
- $R_{bg}$  : Cacah latar (CPS)
- $\eta_f$ : Efisiensi kertas saring (98 %)
- $\eta_p$ : Efisiensi sistem pencacah (%)
- $V$ : Volume *sampling* (m<sup>3</sup>)

Waktu paruh partikulat didapatkan dengan mengukur laju cacah peluruhan setiap 1 menit di salah satu titik lokasi *sampling*. Efisiensi sistem cacah didapatkan dengan mengukur cacahan sumber standar alfa (Am-241) dan beta (Sr-90) terhadap aktivitasnya. Perhitungan efisiensi sistem pencacah ditunjukkan oleh persamaan 2.

$$T_{ru} = \frac{R_{st} - R_{bg}}{A_{st}} \dots (2)$$

dengan:

- $T_{ru}$ : Tingkat Radioaktivitas Udara (Bq/m<sup>3</sup>)
- $R_{sp}$ : Cacah sampel (CPS)
- $R_{bg}$ : Cacah latar (CPS)

Selanjutnya kertas saring dikondisikan didalam *descicator* selama 24 jam dengan kelembaban ruangan adalah 40-60 % dan suhu 18-25<sup>0</sup>C [6]. Konsentrasi massa *PM10* diukur dengan metode gravimetri dan dihitung menggunakan persamaan 3.

$$PM10 = \frac{M_2 - M_1}{V} \dots (3)$$

dengan:

- $PM10$ : Konsentrasi Massa *PM10* (μg/m<sup>3</sup>)
- $M_1$ : Massa filter sebelum pencuplikan (μg)
- $M_2$ : Massa filter setelah pencuplikan (μg)

**D. Analisis Data**

Data hasil pengukuran yang didapatkan adalah konsentrasi massa *PM10* dengan metode gravimetri dan radioaktivitas alfa-beta total yang diukur dengan sistem pencacah LBC. Data tersebut kemudian di analisis secara deskriptif dalam bentuk ringkasan statistik (*mean*, median, modus, standar deviasi, dll) serta di visualisasikan dalam bentuk grafik, tabel, histogram dan diagram *box plot*. Analisis uji statistik berupa analisis satu arah *ANOVA*, rasio, uji-t dan analisis regresi-korelasi menggunakan bantuan perangkat lunak SPSS.

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**A. Prakiraan radionuklida dalam alfa-beta total**

Waktu paro ( $T_{1/2}$ ) radioaktivitas alfa-beta total didefinisikan sebagai selang waktu yang dibutuhkan radionuklida pemancar radiasi alfa-beta untuk meluruh menjadi separuhnya. Sebuah penelitian di Jeddah, Arab Saudi menyatakan radionuklida pemancar radiasi alfa-beta didalam *PM2.5* diudara ambien berasal dari produk peluruhan uranium (U-238), thorium (Th-232) serta radinuklida non deret seperti kalium 40 (K-40) dengan rata-rata konsentrasi berturut-turut adalah 10.8 ± 3.4, 11.8 ± 4.2 dan 301.8 ± 76.1 Bq/kg [7]. Hasil pencacahan alfa beta total persatuan waktu pada Gambar 2 menunjukkan konstanta peluruhan alfa beta total berturut turut adalah 0.016 dan 0.017 sementara itu korelasi hubungan antara waktu peluruhan dengan cacahan mempunyai hubungan koefisien korelasi yang sangat erat sebesar 96.7% untuk alfa total dan 97.98% untuk beta total. Waktu paro ( $T_{1/2}$ ) cacahan alfa-beta total didapatkan melalui persamaan 5.

$$T_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda} \dots (5)$$

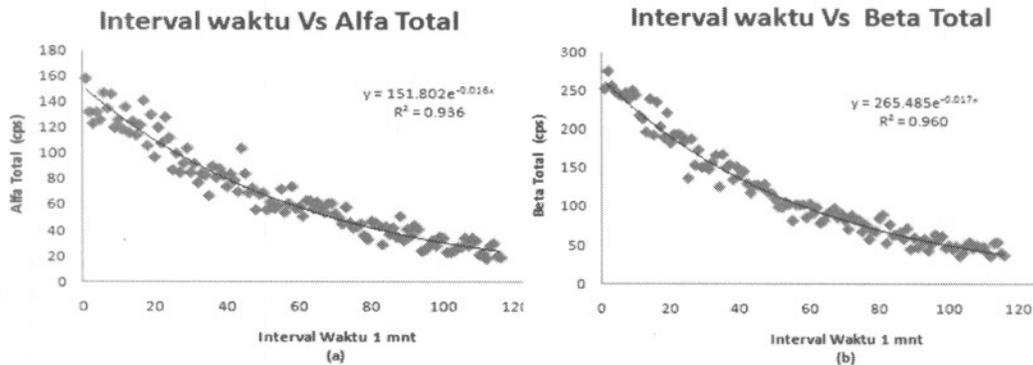
Melalui persamaan tersebut didapatkanlah nilai waktu paro untuk alfa total adalah 43.31 menit sedangkan untuk beta total adalah 40.76 menit. Pada Gambar 3 menunjukkan variasi perubahan cacahan beta total sangat dipengaruhi oleh cacahan alfa total dengan nilai 0.996, sedangkan koefisien korelasinya sebesar 99.7%. Ketiga grafik tersebut memberi dugaan bahwa radionuklida pemancar alfa-beta total berasal

dari deret peluruhan U-238 dan Th-232 hal ini didasarkan waktu paro yang pendek serta koefisien korelasi erat alfa-beta total yang tidak dimungkinkan berasal radionuklida alam K-40 yang memiliki waktu paro panjang dan tidak memancarkan radiasi alfa.

**B. Radioaktivitas alfa-beta total**

Hasil perhitungan deskriptif radioaktivitas rata-rata alfa-beta total untuk 4 periode pemantauan dihasilkan konsentrasi tertinggi terdapat di triwulan 2 tahun 2017 sebesar  $0.86 \pm 0.03 \text{ Bq/m}^3$  untuk alfa total, sedangkan untuk beta total adalah  $1.59 \pm$

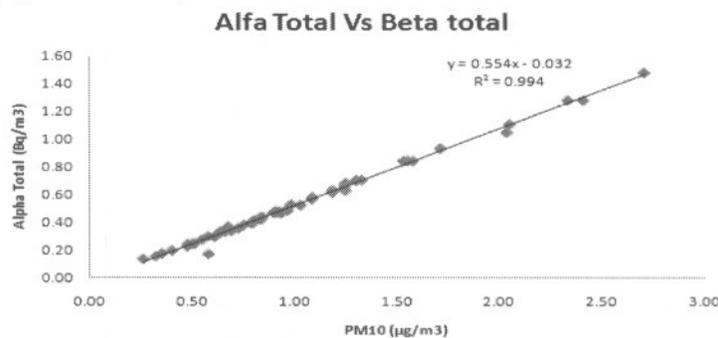
$0.06 \text{ Bq/m}^3$ . Pada grafik boxplot yang ditunjukkan oleh Gambar 4 menunjukkan konsentrasi radioaktivitas alfa-beta total tertinggi adalah di triwulan 2 tahun 2017 dengan tingkat radioaktivitas berturut-turut sebesar  $1.48 \pm 0.041 \text{ Bq/m}^3$  dan  $2.71 \pm 0.085 \text{ Bq/m}^3$ . Nilai radioaktivitas alfa total tertinggi tersebut tersebut tidak melebihi dari nilai baku tingkat radioaktivitas udara untuk Pb-210 sebagai anak luruh U-238 dan Bi-212 anak luruh dari Th-232 yang tertuang pada PERKA BAPETEN No.7 Tahun 2013 yang berturut-turut adalah sebesar  $4.3 \times 10^0$  dan  $3.8 \times 10^3 \text{ Bq/m}^3$  [8].



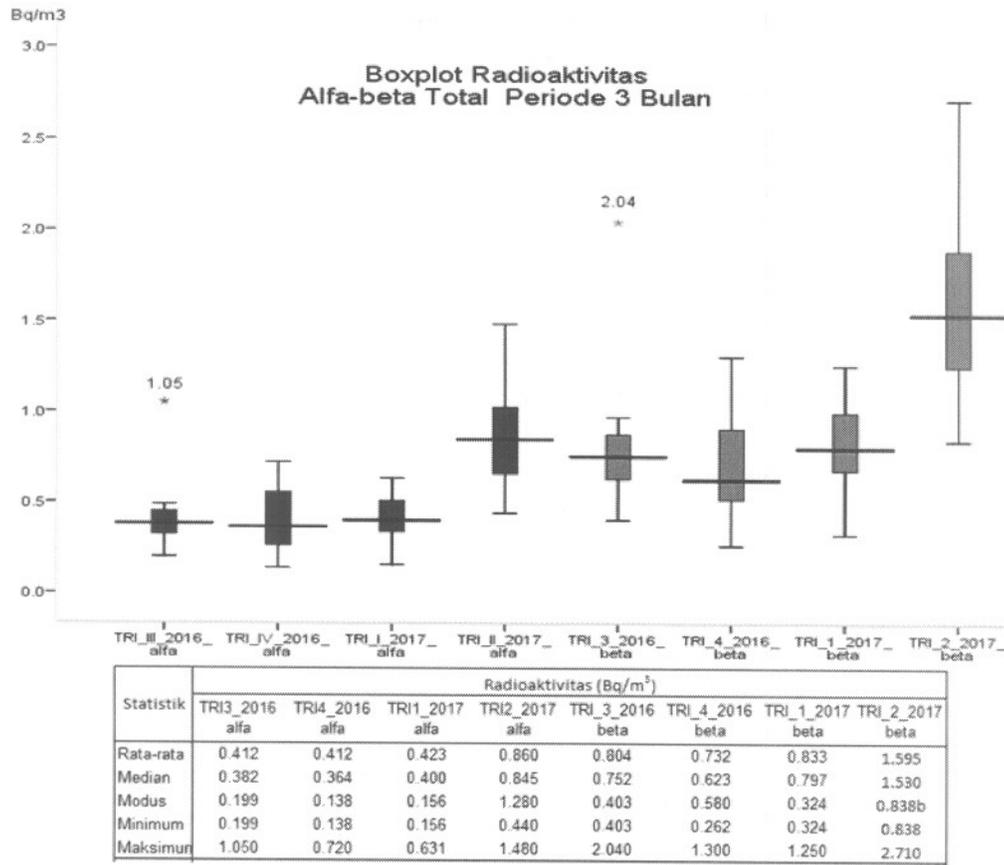
Gambar 2. (a) peluruhan cacahan alpha total, (b) Peluruhan cacahan beta total

Hasil uji *anova* ditunjukkan pada tabel 1 menyatakan bahwa ada perbedaan nyata konsentrasi rata-rata radioaktivitas alfa-beta total yang signifikan diantara ke-4 periode pemantauan. Perbedaan konsentrasi rata-rata tersebut ditunjukkan oleh tabel 2 melalui uji *Post Hoc Multiple Comparisons* dengan metode *Tukey statistic* yang menyatakan bahwa periode pemantauan triwulan 2 tahun 2017 berbeda secara signifikan dengan ke-3 periode pemantauan lainnya. Perbedaan konsentrasi partikulat udara dapat disebabkan oleh faktor meteorologi (curah hujan, arah dan kecepatan angin, kelembaban, intensitas

matahari, suhu, tekanan udara) dan aktivitas kegiatan disekitar lokasi pemantauan yang menghasilkan sumber pencemar. Pada Gambar 5 memberikan hasil distribusi frekuensi radioaktivitas alfa total selama 1 tahun periode pemantauan adalah 48.33 % pada kelas interval 0.25 s.d 0.5  $\text{Bq/m}^3$ , sedangkan, untuk beta total adalah 55% pada tingkat radioaktivitas 0.5 s.d 1.0  $\text{Bq/m}^3$ . Rasio perbandingan radioaktivitas alfa total terhadap beta total adalah sebesar 0.52 yang memberi pengertian konsentrasi radioaktivita beta total akan lebih tinggi  $\pm 2 \text{ Bq/m}^3$  terhadap alfa total



Gambar 3. Korelasi hubungan alfa total dengan beta total.



Gambar 4. Grafik *boxplot* radioaktivitas alfa-beta total berdasarkan periode pemantauan

**C. Konsentrasi Massa PM10**

Grafik Konsentrasi massa *PM10* pada Gambar 6 menunjukkan range konsentrasi massa *PM10* adalah  $16.67 \pm 11.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  –  $316.67 \pm 17.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Konsentrasi masa *PM10* setiap triwulan pemantauan adalah  $124 \pm 14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $113.61 \pm 12.80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $132.13 \pm 13.54 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $187.25 \pm 14.09 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sedangkan konsentrasi rata-rata selama 1 tahun pemantauan adalah  $135.56 \pm 64.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Konsentrasi *PM10* tertinggi melebihi dari nilai baku mutu udara ambien *PM10* [1] sebesar  $150 \mu\text{g}/\text{Nm}^3$  terjadi pada periode pemantauan triwulan 3 tahun 2016 di lokasi pos jaga PPBGN yang berdekatan dengan jalan Lebak Bulus Raya. Konsentrasi massa tinggi pada lokasi tersebut diprediksi karena terdeposisinya partikulat-partikulat kasar yang berasal dari debu jalan dan tanah. Hal tersebut sesuai dengan studi yang dilakukan di Tangerang Selatan yang menyatakan bahwa sumber polutan *PM 10* berasal dari 5 faktor yaitu debu tanah (49.19%), transportasi (25.60%), campuran debu jalan dengan industri (19.04%), industri logam

(6.48%) dan campuran garam laut dengan biomassa (3. 67%) [9]

Pada Gambar 7 diperlihatkan hubungan antara konsentrasi massa *PM10* terhadap radioaktivitas alfa-beta total. Variasi perubahan alfa-beta total yang dipengaruhi oleh perubahan variabel konsentrasi massa menunjukkan trend positif dengan nilai berturut turut 0.172 dan 0.165, sedangkan nilai koefisien korelasi adalah kategori sedang sebesar 41.47% dan 40.62 %.

Tabel 1. Uji Anova radioaktivitas 4 periode pemantauan

**ANOVA**

gross alpha blyokasi					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	.631	14	.045	.455	.945
Within Groups	4.456	45	.099		
Total	5.087	59			

Gross beta					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	7.703	3	2.568	15.779	.000
Within Groups	9.112	56	.163		
Total	16.815	59			

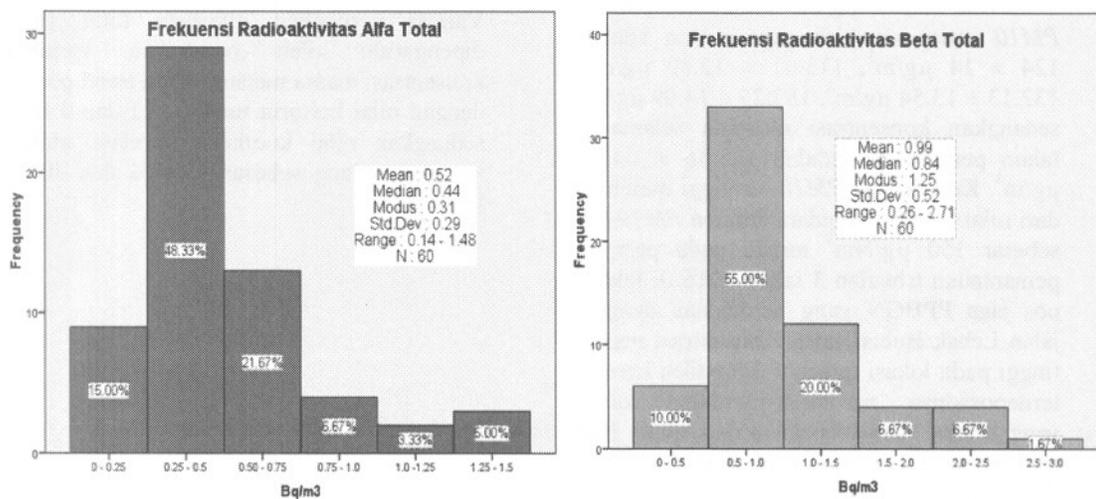
Tabel 2. Uji Post Hoc Multiple Comparisons

Dependent Variable: Gross\_alpha

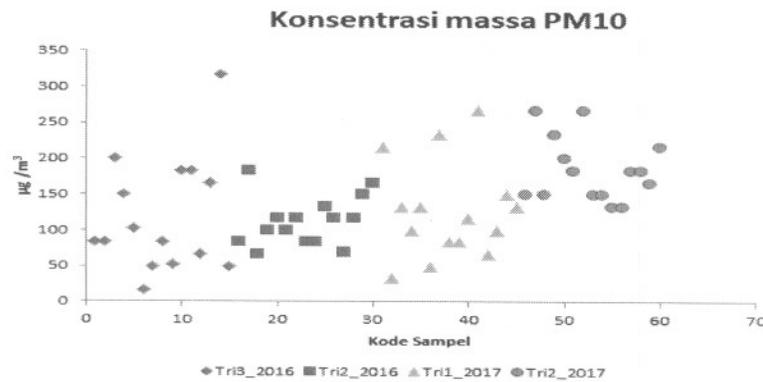
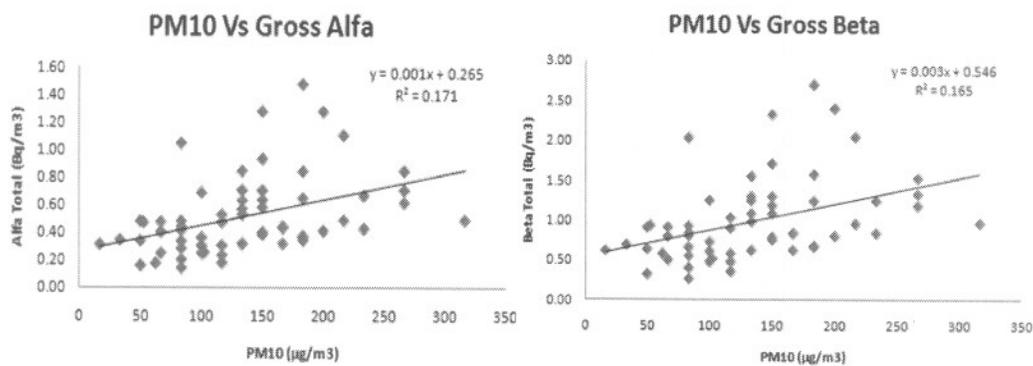
	(I) TRIWULA N	(J) TRIWULA N	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.
Tukey HSD	Tri2_2016	Tri3_2016	.04747	.07973	.933
		Tri1_2017	-.01100	.07973	.999
		Tri2_2017	-.44860 <sup>*</sup>	.07973	.000
	Tri3_2016	Tri2_2016	-.04747	.07973	.933
		Tri1_2017	-.05847	.07973	.883
		Tri2_2017	-.49607 <sup>*</sup>	.07973	.000
	Tri1_2017	Tri2_2016	.01100	.07973	.999
		Tri3_2016	.05847	.07973	.883
		Tri2_2017	-.43760 <sup>*</sup>	.07973	.000
	Tri2_2017	Tri2_2016	.44860 <sup>*</sup>	.07973	.000
		Tri3_2016	.49607 <sup>*</sup>	.07973	.000
		Tri1_2017	.43760 <sup>*</sup>	.07973	.000

Dependent Variable: Gross\_beta

	(I) TRIWULA N	(J) TRIWULA N	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.
Tukey HSD	Tri2_2016	Tri3_2016	-.11093	.14730	.875
		Tri1_2017	-.02907	.14730	.997
		Tri2_2017	-.79133 <sup>*</sup>	.14730	.000
	Tri3_2016	Tri2_2016	.11093	.14730	.875
		Tri1_2017	.14000	.14730	.778
		Tri2_2017	-.90227 <sup>*</sup>	.14730	.000
	Tri1_2017	Tri2_2016	.02907	.14730	.997
		Tri3_2016	.14000	.14730	.778
		Tri2_2017	-.76227 <sup>*</sup>	.14730	.000
	Tri2_2017	Tri2_2016	.79133 <sup>*</sup>	.14730	.000
		Tri3_2016	.90227 <sup>*</sup>	.14730	.000
		Tri1_2017	.76227 <sup>*</sup>	.14730	.000



Gambar 5. Distribusi Frekuensi radioaktivitas alfa-beta total 1 tahun pemantauan

Gambar 6. Konsentrasi massa *PM10*Gambar 7. Grafik Korelasi konsentrasi mass *PM10* terhadap radioaktivitas Alfa-beta total

## KESIMPULAN

Kajian ini memberikan hasil cacahan alfa beta total diprediksi berasal dari radionuklida anak luruh U-238 dan Th-232 yang ditunjukkan dengan hubungan kuat radioaktivitas alfa total terhadap beta total dengan koefisien korelasi 99.7%. Uji anova menunjukkan terdapat perbedaan rata-rata radioaktivitas alfa-beta total periode triwulan 2 tahun 2017 terhadap ke-3 periode pemantauan lainnya. Rasio antara alfa-beta total dalam partikulat udara secara rata-rata adalah 0.52 yang memberi pengertian konsentrasi radioaktivita beta total akan lebih tinggi  $\pm 2 \text{ Bq/m}^3$  terhadap alfa total

Konsentrasi massa tertinggi *PM10* yang melebihi dari nilai baku mutunya diprediksi berasal dari debu jalan dan tanah, hal ini dikarenakan lokasi *sampling* yang dekat dengan Jalan Lebak Bulus Raya. Hubungan positif antara konsentrasi massa *PM10* dengan konsentrasi alfa-beta total memiliki koefisien korelasi sedang sebesar 41.47% dan 40.62%.

## SARAN

Bedasarkan hasil radioaktivitas alfa-beta total disarankan untuk melakukan analisa secara kualitatif untuk menentukan radionuklida yang terdapat didalam *PM10*. Identifikasi unsur dalam *PM10* sebaiknya dilakukan untuk menentukan faktor-faktor yang dapat menentukan prediksi asal partikulat erat

## DAFTAR PUSTAKA

1. Peraturan Pemerintah nomor 41 tahun 1999. Pengendalian Pencemaran Udara Jakarta (ID), (1999).
2. Theakston F. *Health risks of particulate matter from long-range transboundary air pollution, joint WHO/Convention task Force on the health aspects of air pollution*. Denmark WHO, (2006)..
3. Sihono, Sutanto WW, dan Iswanto. Radioaktivitas *PM2.5* dan *PM10* di lokasi PLTU Rembang. Prosiding Seminar Penelitian dan Pengelolaan Perangkat Nuklir Pusat Teknologi

- Akselerator dan Proses Bahan Yogyakarta. Yogyakarta. Indonesia, (2012)
4. Rixson L, Stefanus M. Pengukuran Radioaktivitas Alfa dan Beta Total Dalam Debu Udara di Sekitar Kawasan Nuklir Pasar Ju'mat. Prosiding Pertemuan dan Presentasi Ilmiah Fungsional Pengembangan Teknologi Nuklir VII. Jakarta. Indonesia, (2012)
  5. BADAN TENAGA NUKLIR NASIONAL, *Prosedur Analisis Sampel Radioaktivitas Lingkungan*, BATAN, Jakarta, (1998).
  6. Maenhaut W, Francois F, Cafmeyer J. The "Gent" Stacked Filter Unit (SFU) sampler for the collection of atmospheric aerosols in two size fractions: description and instructions for installation and use. Report No. NAHRES-19, International Atomic Energy Agency, Vienna. hal: 249-263, (1993).
  7. Zytoon MA, Aburas HM, Abdulsalam MI. *Determination of  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{238}\text{U}$  activity concentrations in ambient  $\text{PM}_{2.5}$  aerosols and the associated inhalation effective dose to the public in Jeddah City, Saudi Arabia*. Journal of Environmental Radioactivity. 129:148-156, (2014).
  8. Peraturan Kepala Badan pengawas tenaga Nuklir Nasional nomor 7 tahun 2013. Nilai Batas Radioaktivitas Lingkungan. Jakarta (ID), (2013).
  9. Rixson L, Riani E, Santoso M. Karakterisasi *Particulate Matter (PM)* dengan Teknik Analisis Nuklir dan Strategi Pengendaliannya Studi Kasus Kota Tangerang Selatan [Tesis]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor Jakarta, (2015).