

KARAKTERISASI UNSUR DAN RADIONUKLIDA DALAM PARTIKULAT UDARA DI SEKITAR PLTU CILACAP

CHARACTERIZATION OF ELEMENTS AND RADIONUCLIDES IN THE AIR PARTICULATE AROUND CILACAP COAL-FIRED POWER PLANT

Sri Murniasih, Devi Swasti Prabasiwi, Dewi Puspa Ariany, Sukirno

Pusat Sains dan Teknologi Akselerator - BATAN, Jl. Babarsari No. 21 Kotak Pos 6101 ykbb Yogyakarta 55281
smurni83@gmail.com

Diterima 6 Maret 2020, diterima dalam bentuk perbaikan 30 April 2020, disetujui 3 Juni 2020

ABSTRAK

KARAKTERISASI UNSUR DAN RADIONUKLIDA DALAM PARTIKULAT UDARA DI SEKITAR PLTU CILACAP. Kandungan zat berbahaya dalam partikulat udara menimbulkan masalah kesehatan masyarakat. Tujuan penelitian ini mengkaji kualitas udara di sekitar PLTU Cilacap melalui penilaian konsentrasi unsur menggunakan AAN, serta identifikasi radionuklida menggunakan spektrometri gamma, yang terkandung dalam PM2.5 dan PM10. Pengambilan sampel dilakukan pada tiga lokasi sampling menggunakan stratified random. Sekitar 45 % partikel berasal dari PM2.5 dan 55 % dari PM10. Radionuklida pada PM2.5 dan PM10 yaitu Pb-210, Th-232, Ra-226 dan K-40. Nilai radionuklida dalam PM2.5 dan PM10 terendah adalah Pb-210 ($0,134 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) dan tertinggi adalah K-40 ($6,407 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$). Berdasarkan Perka BAPETEN Nomor 7 Tahun 2017, baku mutu tingkat radionuklida lingkungan udara yang diijinkan untuk Ra-226, Th-232 dan Pb-210 adalah $1,8 \times 10^{-3} \text{ Bq}/\text{m}^3$; $2,3 \times 10^{-3} \text{ Bq}/\text{m}^3$; dan $1,1 \times 10^{-3} \text{ Bq}/\text{m}^3$. Analisis PM2.5 dan PM10 teridentifikasi kandungan As, Al, Ce, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Na, K, Ti, Sb, Rb, V dan Zn. Konsentrasi rerata partikulat PM2.5 dan PM10 yaitu $13,4 \pm 3,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan $49,5 \pm 4,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Nilai tersebut tidak melebihi pedoman kualitas udara WHO adalah 25 dan $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Hal ini menunjukkan kualitas udara di sekitar PLTU Cilacap berjarak 2 Km sampai 3 Km masih dalam batas terkendali.

Kata kunci: PM2.5, PM10, radionuklida, kualitas udara, spektrometri gamma, PLTU, AAN

ABSTRACT

CHARACTERIZATION OF ELEMENTS AND RADIONUCLIDES IN THE AIR PARTICULATE AROUND CILACAP COAL- POWER PLANT. The hazardous substances in air particulates causes the public health problem. The objective of this research is to assess the air quality around the Cilacap power plant by assessing the concentration of element using Neutron Activation Analysis (NAA), and identifying radionuclides contained in PM2.5 and PM 10 using the gamma spectrometry. Sampling was carried out in three sampling locations using stratified random. About 45% of particles came from PM2.5 and 55% come from PM10. Radionuclide in PM2.5 and PM10 is Pb-210, Th-232, Ra-226 dan K-40. The lowest radionuclide value in PM2.5 and PM10 is Pb-210 ($0,134 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$) and the highest is K-40 ($6.407 \mu\text{Bq}/\text{m}^3$). Based on the regulatory of Head of Nuclear Energy Regulatory Agency Indonesia 7th 2017, the quality level of radionuclide in the air environment is permitted for Ra-226, Th-232 and Pb-210 are $1.8 \times 10^{-3} \text{ Bq}/\text{m}^3$; $2.3 \times 10^{-3} \text{ Bq}/\text{m}^3$; and $1.1 \times 10^{-3} \text{ Bq}/\text{m}^3$. The analysis of identified PM2.5 and PM10 contains are As, Al, Ce, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Na, K, Ti, Sb, Rb, V and Zn. The average concentration of PM2.5 and PM10 particulates are $13.4 \pm 3.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ and $49.5 \pm 4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. These values do not exceed the WHO air quality guidelines are 25 and $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. It shows that the air quality around the Cilacap power plant with a distance about 2 Km to 3 Km are within the limits.

Keywords: PM2.5, PM10, radionuclide, air quality, gamma spectrometry, coal-power plant, NAA

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi listrik terus meningkat seiring dengan perubahan gaya hidup masyarakat yang sangat tergantung dengan berbagai benda elektronik. Di Indonesia, kebutuhan listrik setiap tahun meningkat sebanyak

6,9 %. Kebijakan pemerintah dalam rangka memenuhi kebutuhan listrik nasional mencanangkan pembangunan pembangkit tenaga listrik hingga 170 GW sampai tahun 2025 [1]. Pemenuhan kebutuhan listrik di Indonesia sampai tahun 2017, hampir 58,3% dipasok dari pembakaran batubara, 23,2% dari gas, 6% dari minyak bumi, dan 12,52% sisanya disumbangkan dari energi terbarukan, seperti panas bumi, air, matahari, angin, dan biomassa [2].

Pembakaran batubara sebagai bahan bakar pembangkit listrik selain menghasilkan *slag*, abu halus (*fine ash*) dan abu terbang (*fly ash*), juga dapat melepaskan *particulate matter* yang mengandung unsur-unsur yang berbahaya bagi kesehatan manusia dan lingkungan. Meskipun kontruksi PLTU telah dilengkapi *electrostatic precipitator* (ESP) yang mampu meminimalkan pelepasan *particulate matter* ke atmosfer, tetapi karena pembakaran batubara dalam jumlah banyak menyebabkan *particulate matter* dapat dan menjadi sumber pencemaran udara [3]. *Particulate matter* (PM) berdiameter aerodimanis $< 10 \mu\text{m}$ (PM10) merupakan fraksi utama yang dikeluarkan oleh ESP dari suatu pembangkit listrik berbahan bakar batubara. Sedangkan PM berdiameter aerodimanis $< 2,5 \mu\text{m}$ (PM2.5) biasanya berada di udara dalam waktu yang cukup lama dikarenakan ukurannya yang sangat kecil dan ringan. PM2.5 dengan mudah dapat masuk ke dalam sistem pernafasan dan menembus masuk ke dalam jaringan paru-paru karena memiliki ukuran *sub micron*. *Trace elements* yang banyak terkandung dalam PM10 dan PM2.5 sering menjadi permasalahan bagi lingkungan karena toksisitas dan bioakumulasinya. Kandungan logam dan unsur organik yang ada di dalam partikel dan teradsorpsi pada permukaannya telah terbukti menyebabkan pembentukan radikal bebas, yang dapat memicu stres oksidatif dan peradangan [4]. Studi lingkungan dan epidemiologis telah menunjukkan bahwa *particulate matter* (PM) tidak hanya menurunkan kualitas udara tetapi juga memiliki risiko tinggi terhadap kesehatan manusia. Kandungan logam pada PM10 akibat pembakaran batubara terbukti mengandung Ni, Pb, Cu, Cd, As, Zn, Cr, dan Ti yang dapat menyebabkan kerusakan pada DNA [5].

Batubara sebagai bahan bakar PLTU, merupakan mineral yang banyak mengandung radionuklida alami dari terestrial, yang biasa disebut radionuklida primordial seperti U-238, U-235, Th-232 termasuk hasil peluruhannya, serta K-40. Radionuklida dalam batubara biasanya memiliki konsentrasi yang sama seperti yang ada di tanah. Aktivitas pembakaran batubara pada pembangkit listrik dapat menyebabkan peningkatan konsentrasi radionuklida. Pembakaran batubara menghilangkan komponen organik dan meningkatkan tingkat radionuklida dalam abu [6]. Hal ini lah yang menyebabkan PM hasil pembakaran batubara bukan hanya mengandung logam beracun tetapi juga radionuklida yang berpotensi bagi kesehatan masyarakat sekitar.

Saat ini ada 14 unit PLTU berbahan bakar batubara yang telah dibangun di Indonesia, salah satunya yaitu PLTU Adipala Cilacap. Sejak awal September 2016 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) 2 Jawa Tengah Adipala yang berada di Desa Buton Kecamatan Adipala Cilacap mulai beroperasi untuk menghasilkan listrik 660 MW. PLTU Adipala Cilacap dibangun sejak tahun 2010 dengan bahan baku batubara merupakan jenis pembangkit listrik termal. Bahan bakar batubara yang dibutuhkan sebanyak 17 ton tiap hari untuk menghasilkan daya 660W [7].

Di Indonesia, identifikasi kandungan *trace elements*, radionuklida dan unsur toksik lainnya akibat pembakaran batubara masih sangat sedikit dikaji. Hal ini sangat berkebalikan dengan rencana pemerintah untuk terus meningkatkan pembangunan PLTU batubara sampai tahun 2027 untuk memenuhi kebutuhan listrik nasional. Peraturan pemerintah terkait kualitas udara di Indonesia masih belum secara spesifik memberikan batasan kandungan maksimal tiap unsur yang ada dalam PM di udara ambien guna mengendalikan pencemaran udara. Oleh karena itu, pemantauan partikulat udara ambien PM2.5 dan PM10 di sekitar PLTU batubara sangat diperlukan, untuk memantau kualitas udara di sekitar PLTU dan sebagai database yang dapat digunakan instansi terkait dalam mengambil kebijakan untuk pengendalian kualitas udara di Indonesia.

Beberapa penelitian yang dilakukan terkait pemantau udara akibat pembakaran batubara telah dilakukan beberapa peneliti diantaranya yaitu kandungan *trace elements* pada emisi partikel halus dalam PM10 dan partikel kasar (PM2.5) hasil pembakaran batubara di PLTU Cilacap mengandung unsur As, Sb, Na, K, Fe, Pb, Zn, Be, Sc, V, Mo, Co, Cu, Ag, Sn dengan 60% nya terkandung dalam partikel halus. Unsur Na, Be dan Sn diidentifikasi sebagai unsur jejak baru hasil pembakaran batubara, hal ini berdasarkan perbandingan kandungan bahan batubara sebagai umpan [7]. Pengukuran *trace elements* dalam PM2.5 akibat pembakaran batubara di PLTU Cilacap diteliti juga oleh Lestari (2015) dimana kandungan Al, Ca, Co, Cr, Fe, K, Mg, Mn, Na, Ni, Pb, S, Si, Ti dan Zn teridentifikasi dengan baik menggunakan metode AAN, sedangkan kandungan Cr, Mn, Ni, Pb, Ti dan Zn nilainya tidak lebih tinggi dibandingkan kandungannya dalam udara ambien di kota Bandung, Serpong dan Jakarta [8].

halus dengan ukuran $\leq 2,5 \mu\text{m}$ (PM) dan partikulat kasar berukuran $\leq 10 \mu\text{m}$ (PM) yang terjebak pada permukaan filter. Filter ditempatkan dalam plastik ditutup rapat dan diberi identitas.

Analisis karakterisasi massa PM2.5 dan PM10

Massa aerosol untuk PM2.5 dan PM10 ditentukan dengan menimbang filter sebelum dan sesudah paparan pada suhu sekitar dan tekanan atmosfer dengan keseimbangan analitik. Dicatat massa filter sebelum digunakan dan dimasukkan ke wadah tertutup rapat kemudian ditempatkan dalam eksikator, sebelum dimulainya *sampling*. Filter dibawa ke lokasi *sampling*, setelah dilakukan *sampling* selama 24 jam, filter tersebut dimasukan dalam wadah awal tertutup rapat dibawa kembali ke laboratorium dan disimpan di eksikator sampai dilakukan analisis massa untuk meminimalkan volatilisasi. Penyimpanan filter pada eksikator yang dijaga kelembaban udaranya dan didiamkan selama 7 hari sebelum dilakukan penimbangan. Dicatat massa filter setelah dilakukan *sampling*, sehingga diketahui massa partikel yang ada dalam masing-masing filter.

Analisis PM2.5 dan PM10 untuk radionuklida

Sampel PM2.5 dan PM10, hasil *sampling* disimpan selama 30 hari sebelum dilakukan pengukuran radionuklida dengan tujuan untuk mencapai keseimbangan sekuler [9]. Semua sampel (PM2.5; PM10 dan blanko) dilakukan pengukuran masing-masing 24 jam dengan menggunakan spektrometer gamma. Blanko diambil dari filter kosong yang diperlakukan dengan prosedur yang sama seperti sampel. Radionuklida hasil pengukuran sampel antara lain Pb-212 (239 keV), Pb-214 (352 keV), Bi-214 (609, 1120 dan 1765 keV), Ac-228 (911 keV), Tl-208 (2615 keV) Pb-210 (46,5 keV) dan K-40 (1461 keV). Dengan asumsi bahwa kesetimbangan sekuler tercapai antara radionuklida Th-232 dan U-238 dan hasil peluruhannya. Aktivitas Th-232 ditentukan dari aktivitas rata-rata Pb-212, Tl-208 dan Ac-228 dalam sampel, sedangkan aktivitas Ra-226 ditentukan dari rerata aktivitas Pb-214 dan peluruhan Bi-214 [9][10].

Analisis PM2.5 dan PM10 untuk multi unsur

Sampel PM2.5 dan PM10 yang telah diukur kandungan radionuklida, selanjutnya dilakukan pengidentifikasian logam berat berbahaya dan metalloid lainnya menggunakan metode AAN. Filter PM10, PM2.5 dan blanko, diambil sebagian dan ditimbang sebanyak 0,2000 g yang dimasukkan ke dalam vial polietilen. Sampel dimasukkan dalam kelongsong pneumatik untuk iradiasi pendek, dimana setiap kelongsong hanya terisi 1 sampel. Untuk iradiasi umur menengah dan panjang, sampel dimasukkan ke kelongsong iradiasi LDPE. Setiap kelongsong iradiasi LDPE berisi sampel PM, blanko filter, blanko standar, standar primer dan sekunder.

Iradiasi sampel menggunakan Reaktor Riset Kartini berdaya 100 kW dengan fluks neutron termal sekitar $0,58 \cdot 10^{11} \text{ n.cm}^{-2}.\text{det}^{-1}$. Iradiasi pendek menggunakan fasilitas pneumatik dengan waktu iradiasi dan waktu tunda pengukuran masing-masing selama 5 menit. Iradiasi menengah dan panjang dilakukan pada fasilitas Lazy Suzan selama 3 x 6 jam. Pengukuran unsur umur paruh menengah dilakukan setelah 3-4 hari setelah reaktor shut down, sedangkan untuk umur paruh panjang 3-4 minggu setelah reaktor *shut down*. Semua hasil pengukuran disimpan dalam file dengan kode sama dengan yang ada dalam log book.

Analisis kualitatif unsur menggunakan metode AAN dilakukan berdasarkan energi gamma karakteristik untuk tiap unsur, sedangkan analisis kuantitatif menggunakan metode komparatif yaitu membandingkannya dengan standar tetes sekunder. Analisis kualitatif unsur As dilakukan pada tenaga gamma 559,1 keV; Ce (145,4 keV); Cd (527,9 keV); Co (1332 keV); Cr (320 keV); Cu (1039 keV); Fe (1039 keV); Mg (1014 keV); Mn (1810 keV); Na (1368 keV); K (1524 keV); Ti (320 keV); Sb (1691 keV); V (1434 keV); dan Zn (1115 keV). Validasi hasil analisis sampel dilakukan dengan menggunakan SRM NIST 1648a *Urban Particulate Matter* yang mendapat perlakuan sama dengan sampel.

HASIL DAN PEMBAHASAN

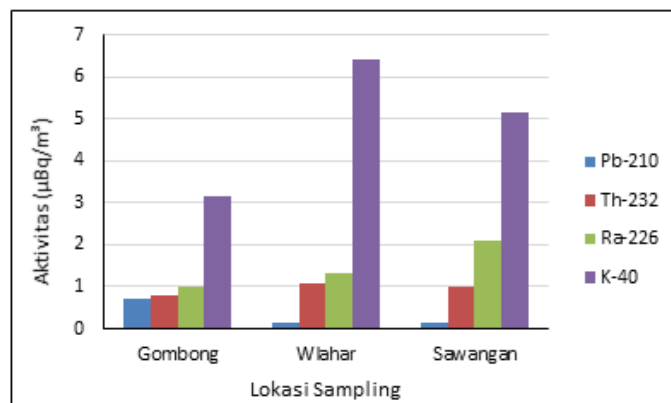
Paparan manusia terhadap kontaminan di udara dapat diperkirakan dengan pemantauan kualitas udara. Referensi standar dibuat untuk membedakan antara atmosfer yang tercemar dan tidak tercemar. Standar kualitas udara menentukan batasan tingkat konsentrasi maksimum polutan di atmosfer yang diterapkan oleh Organisasi Kesehatan Dunia dan Badan Perlindungan Lingkungan US-EPA (*US Environmental Protection Agency*).

Berdasarkan efek kesehatan jangka pendek dan jangka panjang, US-EPA merekomendasikan standar kualitas udara untuk PM_{2.5} dan PM₁₀ masing-masing adalah 12 µg/m³ dan 150 µg/m³ dengan waktu rerata yaitu 24 jam. Negara Kanada, melalui Canada-Wide Standards (CWS) menetapkan batasan kualitas udara untuk PM_{2.5} dan PM₁₀ yaitu 12 µg/m³ dan 50 µg/m³ dengan waktu rata-rata 24 jam [11]. Sedangkan *World Health Organization* (WHO) menerapkan standar kualitas air untuk PM_{2.5} dan PM₁₀ yaitu 25 µg/m³ dan 50 µg/m³ dengan waktu rata-rata 24 jam [12]. Menurut peraturan pemerintah Republik Indonesia No 41 Tahun 1999 tentang pengendalian pencemaran udara baku mutu udara ambien nasional nilai baku mutu untuk PM_{2.5} dan PM₁₀ masing-masing adalah 65 µg/Nm³ dan 150 µg/Nm³ [13].

Hasil pengukuran sampel PM_{2.5} di tiga daerah sekitar PLTU Adipala (Gombang, Wlahar dan Swangan) berturut-turut adalah 15,65 µg/m³, 14,72 µg/m³ dan 19,895 µg/m³ dengan rata-rata 16,757 µg/m³, sedangkan untuk sampel PM₁₀ masing-masing adalah 36,67 µg/m³, 34,23 µg/m³ dan 41,92 µg/m³ dengan rata-rata 37,61 µg/m³. Dibandingkan Negara Cina daerah sekitar delta sungai Pearl dimana konsentrasi PM_{2.5} berkisar antara 8 - 270 µg/m³ dengan rerata 62.5±33.5 µg/m³ sedangkan konsentrasi PM₁₀ berkisar antara 16 - 363 µg/m³ dengan rerata 91.6±47.2 µg/m³ [14], maka hasil identifikasi PM_{2.5} dan PM₁₀ di tiga daerah sekitar PLTU Adipala masih jauh lebih rendah dibandingkan dengan negara Cina. Berdasarkan ketentuan WHO/US-EPA dan CWS maupun PP No 41 Tahun 1999, konsentrasi PM_{2.5} dan PM₁₀ pada penelitian ini juga masih dapat dikatakan aman. Apabila merujuk pada ketetapan US-EPA maka hasil pengukuran PM_{2.5} di tiga daerah sekitar PLTU Adipala dikategorikan telah beresiko terhadap kesehatan masyarakat sekitar [11].

Empat radionuklida teridentifikasi dalam PM_{2.5} dan PM₁₀ yaitu Th-232, Ra-226 sebagai anak luruh U-238, Pb-210 dan K-40. Radionuklida Th-232, Ra-226, Pb-210 dan K-40 diklasifikasikan sebagai radiasi alami yang keberadaannya sudah ada secara alami di bumi, dan dapat mengalami peningkatan akibat kegiatan manusia [15].

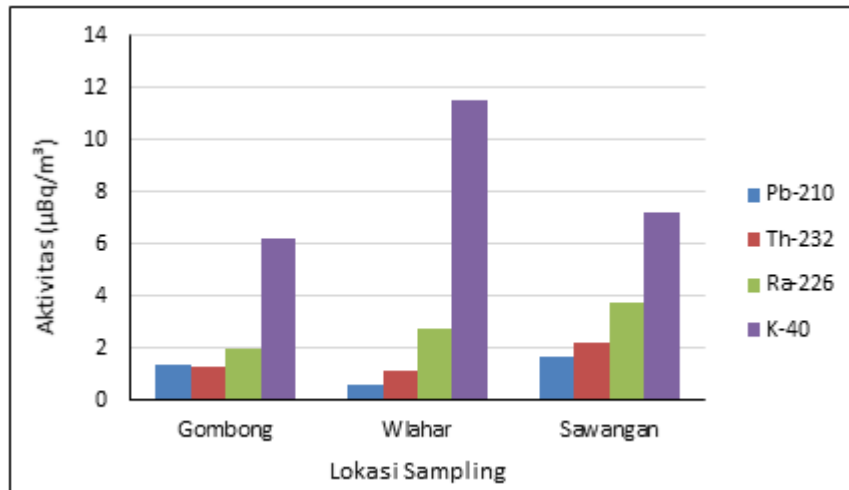
Aktivitas radionuklida dalam sampel PM_{2.5} antara lain: Pb-210 berkisar 0,134 - 0,715 µBq/m³, Th-232 berkisar 0,809 - 1,075 µBq/m³, Ra-226 berkisar 0,226 - 1,003 µBq/m³ sedangkan K-40 berkisar 3,157 - 6,407 µBq/m³ (Gambar 2). Menurut Perka BAPETEN Nomor 7 Tahun 2017 dijelaskan bahwa baku mutu tingkat radionuklida di lingkungan merupakan batas tertinggi yang dinyatakan dalam konsentrasi aktivitas radionuklida di lingkungan [16]. Dimana batas maksimal keberadaan radionuklida Pb-210, Ra-226 dan Th-232 di lingkungan berturut-turut adalah 1100, 1800 dan 2300 µBq/m³ sedangkan untuk radionuklida K-40 tidak terdefiniskan dalam Perka tersebut. Hasil pengukuran semua radionuklida dalam filter PM_{2.5} masih di bawah persyaratan yang ditentukan, sehingga dapat disimpulkan keberadaan PLTU Adipala tidak memberikan dampak paparan radionuklida yang signifikan terhadap penduduk yang tinggal dengan jarak kurang lebih 2 km dari PLTU.



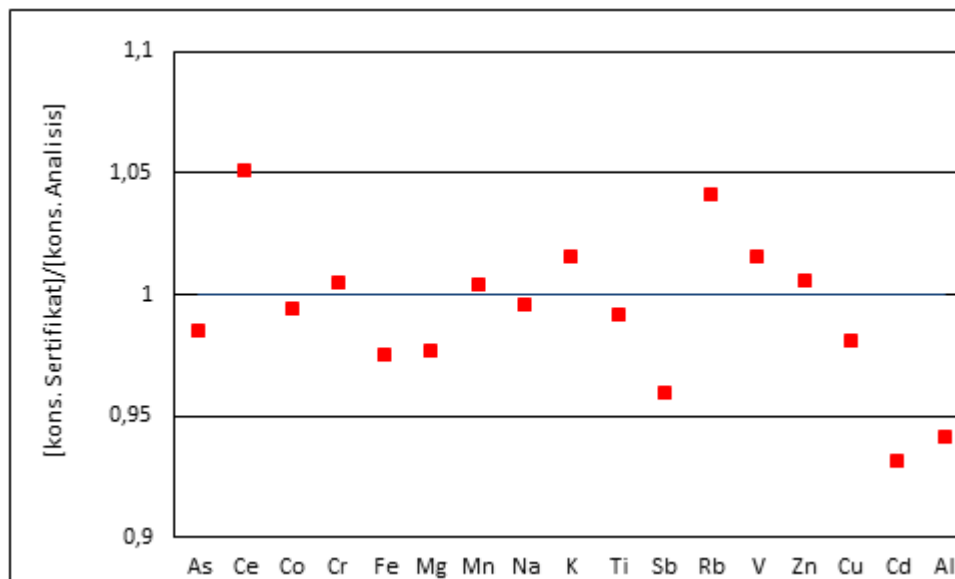
Gambar 2. Karakterisasi aktivitas radionuklida pada filter PM_{2.5}

Pada Gambar 3 dapat diketahui bahwa aktivitas radionuklida dalam sampel PM₁₀ berturut-turut adalah K-40 > Ra-226 > Th-232 > Pb-210. Kandungan radionuklida tertinggi adalah K-40 dengan aktivitas berkisar 6,217 µBq/m³ hingga 11,527 µBq/m³ dengan rerata 8,32 µBq/m³, radionuklida Ra-226 berkisar 2,006 µBq/m³ hingga 3,74 µBq/m³ dengan rerata 2,84 µBq/m³, radionuklida Th-232 berkisar 1,103 µBq/m³ hingga 2,195 µBq/m³ dengan rerata 1,52 µBq/m³ dan radionuklida Pb-210 berkisar 0,594 µBq/m³ sampai 1,678 µBq/m³ dengan rerata 1,22 µBq/m³.

Aktivitas masing-masing radionuklida dalam sampel PM 10, masih di bawah baku mutu yang oleh Perka BAPETEN Nomor 7 Tahun 2017 dimana nilai Ra-226, Th-232 dan Pb-210 berturut-turut adalah $1,8 \times 10^{-3}$ Bq/m³; $2,3 \times 10^{-3}$ Bq/m³; dan $1,1 \times 10^{-3}$ Bq/m³. Konsentrasi Pb-210 pada atmosfer di negara Cina berkisar antara 0,03 hingga 1,83 mBq/m³ [17], dan jika dibandingkan dengan hasil analisis kandungan Pb-210 pada PM 2.5 dan PM 10 pada penelitian ini masih jauh lebih rendah dari konsentrasi Pb-210 di negara Cina.



Gambar 3. Karakterisasi aktivitas radionuklida pada filter PM10



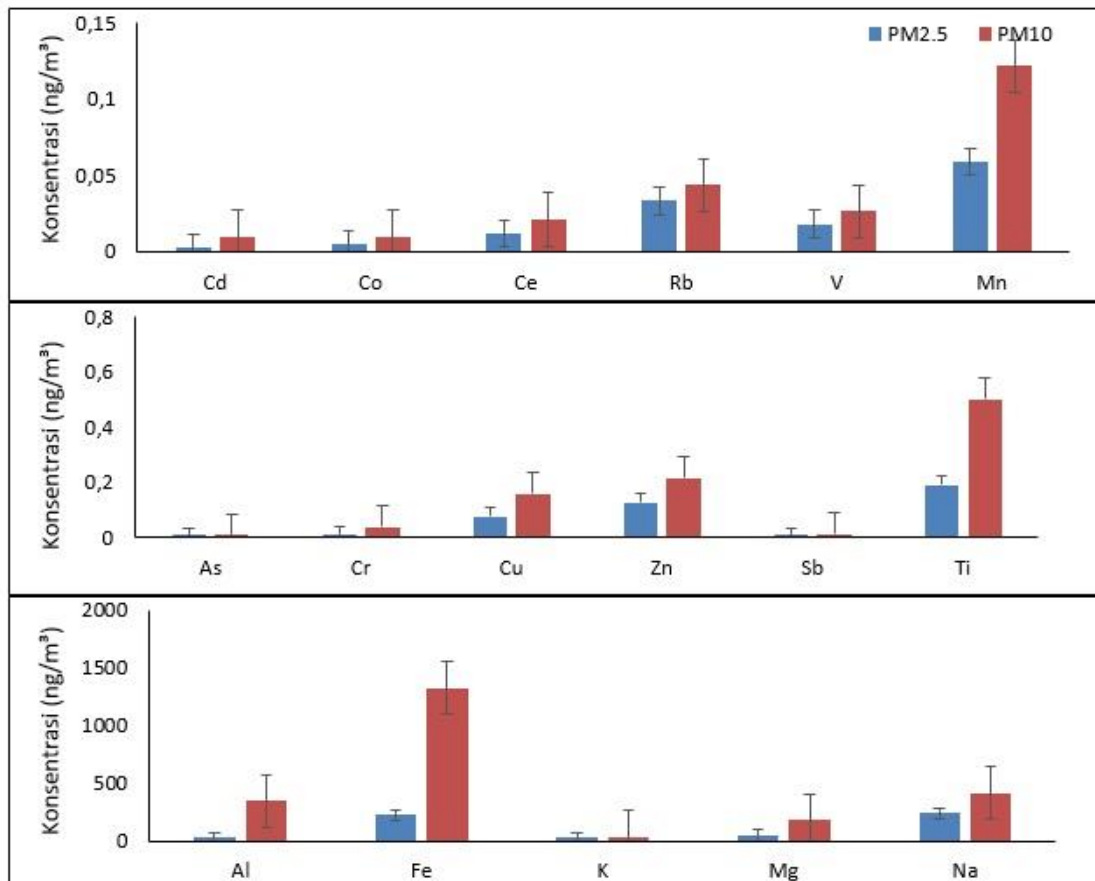
Gambar 4. Rasio nilai sertifikat dengan hasil analisis SRM NIST 1648a *Urban Particulate Matter*

Hasil validasi yang dilakukan menggunakan SRM NIST 1648a dapat dilihat pada Gambar 4 dimana rasio perbandingan antara konsentrasi yang tercantum dalam sertifikat dibandingkan hasil analisis menunjukkan nilai $0,9 < x < 1,1$. Dengan kata lain nilai recovery yang diperoleh lebih besar dari 90% untuk semua unsur yang dianalisis, sehingga hasil analisis yang diperoleh dapat dipertanggungjawabkan.

Analisis unsur Mn, Mg, Ti, Cu dan V dilakukan pada pengukuran umur paruh pendek, unsur As, Cd, Na, dan K dilakukan pada pengukuran umur sedang, dan untuk unsur Ce, Cd, Co, Cr, Fe, Sb, Rb dan V dilakukan pada

pengukuran umur panjang. Semua pengukuran sampel menggunakan spektrometer gamma yang dilengkapi detektor HPGe dengan efisiensi 35%.

Karakteristik konsentrasi rata-rata partikulat PM2.5 dan PM10 ditemukan masing-masing $13,4 \pm 3,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ dan $49,5 \pm 4,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, level konsentrasi tersebut tidak melebihi nilai pedoman kualitas udara WHO adalah 25 dan $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Berdasarkan standar kualitas udara US-EPA maka hasil pengukuran PM2.5 di tiga daerah sekitar PLTU Adipala sudah dikategorikan telah beresiko terhadap kesehatan masyarakat sekitar PLTU [11]. Hasil analisis sampel filter PM2.5 dan PM10 menggunakan metode analisis aktivasi neutron teridentifikasi tujuh belas logam yaitu: As, Al, Ce, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mg, Mn, Na, K, Ti, Sb, Rb, V dan Zn. Ketujuh belas logam tersebut dibagi menjadi tiga kelompok yaitu kelompok logam berat berbahaya terdiri dari As, Cd, Cr, Cu, Sb dan Zn, logam *ultra trace metaloid* terdiri dari Co, Ce, Rb, V, Al, Mn dan Ti dan logam *trace metaloid* terdiri dari Fe, K, Mg dan Na (Gambar 5).



Gambar 5. Kandungan rerata unsur dalam sampel PM10 dan PM2.5 yang dilakukan simultan 24 jam

Logam berat berbahaya seperti As, Cd, Cr, Cu, Sb dan Zn yang terdapat di udara, telah banyak dilakukan oleh beberapa peneliti karena efeknya terhadap kesehatan masyarakat. Kandungan logam berat berbahaya pada filter PM2.5 dengan konsentrasi terkecil adalah logam As ($0,001 \text{ ng}/\text{m}^3$) dan yang tertinggi logam Cu ($0,061 - 0,146 \text{ ng}/\text{m}^3$) dengan rata-rata $0,114 \text{ ng}/\text{m}^3$. Urutan penurunan konsentrasi rata-rata logam (ng/m^3) pada filter PM2.5 adalah: Cu ($0,114$) > Zn ($0,126$) > Cr ($0,009$) > Cd ($0,002$) > Sb ($0,0017$) > As ($0,001$), sedangkan untuk PM 10 adalah Zn ($0,217$) > Cu ($0,123$) > Cr ($0,038$) > Sb ($0,014$) > Cd ($0,010$) > As ($0,002$).

Tingkatan batasan aman kandungan logam berat yang ada di udara yang tidak menimbulkan resiko kanker (HQ) untuk masyarakat sekitar antara lain: As ($2,12 \times 10^{-1} \mu\text{g}/\text{m}^3$), Cd ($4,27 \times 10^{-4} \mu\text{g}/\text{m}^3$), Cr ($7,53 \times 10^{-3} \mu\text{g}/\text{m}^3$) dan Sb ($1,45 \times 10^{-2} \mu\text{g}/\text{m}^3$) [18]. Hasil penelitian yang dilakukan diketahui bahwa kandungan As, Cd, Cr, dan Sb di 3 lokasi sekitar PLTU Adipala masih dapat dikategorikan aman dan tidak berdampak menimbulkan resiko bagi

kesehatan masyarakat sekitar. Hal ini menunjukkan keberadaan PLTU Adipala yang berjarak sekitar 2 km dari pemukiman penduduk, belum memberikan pengaruh yang signifikan untuk kandungan As, Cd, Cr, dan Sb, yang dapat mempengaruhi kualitas udara sekitar.

Kelompok kedua logam *ultra trace metaloid* dimana unsur Co mempunyai konsentrasi terendah yaitu 0,001 ng/m³ sampai 0,012 ng/m³ untuk filter PM2,5 sedangkan pada filter PM10 adalah 0,004 ng/m³ sampai 0,017 ng/m³. Konsentrasi tertinggi terdapat pada unsur Ti yaitu untuk filter PM2,5 berkisar 0,046 ng/m³ sampai 0,329 ng/m³ dan untuk filter PM10 berkisar 0,211 ng/m³ – 0,656 ng/m³. Pedoman kualitas udara Organisasi Kesehatan Dunia (WHO) mencantumkan baku mutu untuk unsur pada udara ambient PM2.5 dan PM10 yaitu 50 µg/m³ dan 150 µg/m³ [12], sedangkan untuk standar US-EPA batasan aman konsentrasi unsur dalam PM2.5 dan PM10 adalah 12 µg/m³ dan 50 µg/m³ [11]. Batasan aman kandungan Al dan Mn di udara dalam PM2.5 yang tidak menimbulkan dampak resiko kanker (EC) adalah $4,54 \times 10^{-2}$ µg/m³ dan $2,88 \times 10^{-2}$ µg/m³ [18]. Tingkat konsentrasi Al yang terdeteksi dalam sampel PM2.5 berkisar 14 - 16 ng/m³ sedangkan konsentrasi Mn berkisar antara 0,022 – 0,088 ng/m³, sehingga dapat dikatakan bahwa nilai Mn dalam udara di sekitar PLTU Adipala masuk katagori aman.

Kandungan rerata unsur dalam PM2.5 dan PM10 yang dirilis ke atmosfer dari PLTU Batubara di negara Pennsylvania dimana konsentrasi PM2.5 berkisar antara 0,2 – 11,6 µg/m³ sedangkan rerata konsentrasi PM10 berkisar antara 16,1 – 20,5 µg/m³ [19]. Jika dibandingkan dengan negara Pennsylvania kandungan rerata PM2.5 dan PM10 yang dirilis dari PLTU Adipala lebih tinggi, akan tetapi nilai tersebut tidak melebihi batasan aman yang direkomendasikan oleh US-EPA dan WHO.

Kelompok ketiga yaitu untuk logam *trace metaloid* dimana konsentrasi tertinggi terdapat pada unsur Na yaitu berkisar 44,13 ng/m³ sampai 387,231 ng/m³ untuk filter PM2.5 dan pada filter PM10 konsentrasi tertinggi terdapat pada unsur Fe yaitu berkisar 1,093 µg/m³ sampai 1,579 µg/m³. Unsur Al, Na dan Fe pada umumnya tinggi dikarenakan unsur tersebut berasal dari kerak bumi yang ikut teruapkan melalui proses kondensasi, sehingga unsur Na dapat digunakan untuk menilai asal usul antropogenik suatu polutan.

Hasil analisis analisis sampel PM2.5 dan PM10 dibandingkan hasil analisis di negara Algeria, China dan NUS-EPAI (seperti yang disajikan pada Tabel (1), dapat diketahui bahwa kualitas udara di daerah sekitar PLTU Adipala Cilacap masih memberikan *range* nilai yang dapat ditolerir dan dapat dikatakan aman bagi kesehatan masyarakat sekitar. Hal ini membuktikan bahwa keberadaan PLTU Adipala saat ini belum memberikan pengaruh yang signifikan pada kualitas udara di daerah sekitarnya, akan tetapi hal ini perlu mendapat perhatian bagi pemerintah terkait mengingat kandungan PM2.5 dan PM10 masih lebih tinggi dibandingkan negara Pennsylvania.

Tabel 1. Perbandingan hasil analisis unsur dengan beberapa penelitian lainnya

Unsur	Rerata penelitian ini (ng/m ³)		Algeria (ng/m ³)[20]		China bagian timur laut (ng/m ³) [21]		NUS-EPAI (ng/m ³)[22]	
	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10	PM2.5	PM10
Cd	0.002	0.010			0.1–92.4	0.1–119.8	0.01	0.02-0.03
As	0.001	0.007	93.2	78.78	0.1–346.2	0.1–406.4		
Cr	0.009	0.038	45.47	42.37	0.0–42.4	0.5–73.6		
Cu	0.077	0.160	2662.18	861.22	0.0–281.2	1.5–281.6	0.08	0.09-0.11
Zn	0.126	0.217			1.2–345.3	12.0–704.6	41.3-42.4	41.7-49.4
Sb	0.002	0.015						
Co	0.005	0.010			0.0–1.9	0.1–6.1		
Ce	0.011	0.021						
Rb	0.033	0.044						
V	0.018	0.026			0.0–15.3	0.4–44.4		
Al	15	344			14.8–10911.6	49.4–18873.6		
Mn	0.059	0.121	3298.7	3804.72	0.7–141.7	3.0–353.5		
Ti	0.192	0.500			2.3–352.8	2.6–1235.0		
Fe	223	1325	7202.63	5214.17	9.0–4277.4	90.5–14037.4		
K	17.834	35.337			14.0–35323.5	127.0–30356.4		
Mg	44.133	181.400			6.3–4421.9	14.5–5315.9		
Na	237.587	416.013			1.4–1537.3	81.0–4146.4		

KESIMPULAN

Investigasi kualitas udara di sekitar PLTU Adipala Cilacap yang dilakukan pada periode Juli 2018 menunjukkan bahwa massa partikulat tersuspensi PM₁₀ dan PM_{2.5} masih dibawah baku mutu kualitas udara menurut WHO maupun US-EPA (50 µg/m³ dan 25 µg/m³). Berdasarkan Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir (PerKa BAPETEN) Nomor 7 Tahun 2017, aktivitas radionuklida Pb-210, Ra-226, Th-232 dan K40 yang terkandung dalam PM_{2.5} dan PM₁₀ masih dinyatakan aman bagi kesehatan masyarakat sekitar. Kandungan logam berat berbahaya dalam filter PM_{2.5} berurut-turut adalah: Cu> Zn>Cr> Cd> Sb>As, sedangkan untuk PM₁₀ adalah Zn> Cu> Cr> Sb> Cd> As.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada pemerintah melalui anggaran DIPA 2018 PSTA BATAN sehingga penelitian ini dapat terlaksana. Penulis mengucapkan terima kasih kepada sdr Sutanto Wisnu Wardhana yang telah membantu penelitian ini baik dalam sampling maupun peparasi sampel. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada rekan rekan bidang reaktor yang telah membantu melakukan iradiasi sampel. Tak lupa, penulis mengucapkan terima kasih kami kepada: 1. Badan Kesatuan Bangsa dan Politik (KESBANGPOL) atas pemberian ijin surat rekomendasi penelitian dan pengabdian masyarakat. 2. Badan Pemerintah Perencanaan Pembangunan Penelitian dan Pengembangan Daerah - Pemerintah Kabupaten Cilacap, yang memberikan izin pelaksanaan penelitian di wilayah Kecamatan Adipala dan PLTU Adipala.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. A. A. N. Hidayat, "ESDM_ Kebutuhan Listrik Nasional Naik 6,9 Persen Tiap Tahun - Bisnis Tempo," *Tempo.co*, 2019. .
- [2]. KESDM, "RUPTL PT PLN (PERSERO) 2018-2027 Kebijakan Ketenagalistrikan," 2018.
- [3]. J. Wang, Z. Yang, S. Qin, B. Panchal, Y. Sun, and H. Niu, "Distribution characteristics and migration patterns of hazardous trace elements in coal combustion products of power plants," *Fuel*, vol. 256, 2019.
- [4]. T. Jayasekher, "Aerosols near by a coal fired thermal power plant: Chemical composition and toxic evaluation," *Chemosphere*, vol. 75, no. 11, pp. 1525–1530, 2009.
- [5]. S. Xiaoyan, S. Longyi, Y. Shushen, S. Riyang, S. Limei, and C. Shihong, "Trace elements pollution and toxicity of airborne PM₁₀ in a coal industrial city," *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 6, no. 3, pp. 469–475, 2015.
- [6]. J. Suhana and M. Rashid, "Naturally occurring radionuclides in particulate emission from a coal fi red power plant : A potential contamination ?," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 4, no. 4, pp. 4904–4910, 2016.
- [7]. P. Sri, S. P. Hadi, and H. Setiyo, "Trace elements in fine and coarse particles emitted from coal-fired power plants with different air pollution control systems," *J. Environ. Manage.*, vol. 250, no. May, pp. 1–9, 2019.
- [8]. D. D. Lestiani, M. Santosa, K. Kurniawati, N. Adventini, and D. P. D. Atmodjo, "Characteristics of Feed Coal and Particulate Matter in the Vicinity of Coal-fired Power Plant in Cilacap, Central Java, Indonesia," *Procedia Chem.*, vol. 16, pp. 216–221, 2015.
- [9]. J. Alberto *et al.*, "Natural Radionuclides , Rare Earths and Heavy Metals Transferred to the Wild Vegetation Covering a Phosphogypsum Stockpile at Barreiro , Portugal," *Water Air Soil Pollut.*, pp. 228–235, 2017.
- [10]. F. Amini, B. Farid, M. Reza, and F. Behnam, "Distribution of natural radionuclides and assessment of the associated radiological hazards in the rock and soil samples from a high - level natural radiation area , Northern Iran," *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, vol. 322, no. 3, pp. 2091–2103, 2019.
- [11]. N. England *et al.*, "What are the Air Quality Standards for PM ?," 2020. [Online]. Available: <https://www3.US-EPA.gov/region1/airquality/pm-aq-standards.html>.
- [12]. Anonim, "Air quality guideline," *Wikipedia*, 2020.
- [13]. Anonim, "Peraturan Pemerintah RI No. 41 Tahun 1999 Tentang Pengendalian Pencemaran Udara," 1999.

- [14].S. Zhou *et al.*, "High-resolution sampling and analysis of ambient particulate matter in the Pearl River Delta region of southern China : source apportionment and health risk implications," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 18, pp. 2049–2064, 2018.
- [15].S. K. Sahu *et al.*, "Partitioning behavior of natural radionuclides during combustion of coal in thermal power plants," *Environ. Forensics*, vol. 18, no. 1, pp. 36–43, 2017.
- [16].Bapeten, "PerKa Badan Pengawas Tenaga Nuklir No.7 tahun 2017 Tentang Nilai Batas Radionuklida Lingkungan," 2017.
- [17].Z. Yanqi and J. Ziyang, "Estimation of Po-210 and Pb-210 Emissions from Coal Energy Use in China," in *7th International Conference on Energy, Environment and Sustainable Development (ICEESD 2018)*, 2018, vol. 163, no. Iceesd, pp. 1576–1581.
- [18].X. Wang *et al.*, "Spatiotemporal Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM 2.5 in Zhejiang Province," *nternational J. Environ. Res. Public Heal.*, pp. 1–18, 2018.
- [19].C. D. Bray, W. Battye, P. Uttamang, P. Pillai, and V. P. Aneja, "Characterization of Particulate Matter (PM 2.5 and PM 10) Relating to a Coal Power Plant in the Boroughs of Springdale and Cheswick, PA," *Atmosphere (Basel)*, vol. 8, pp. 186–198, 2017.
- [20].A. Talbi, Y. Kerchich, and R. Kerbach, "Assessment of annual air pollution levels with PM1, PM2.5, PM10 and associated heavy metals in Algiers , Algeria," *Environ. Pollut.*, vol. 232, pp. 252–263, 2018.
- [21].Y. Hao, X. Meng, X. Yu, M. Lei, W. Li, and F. Shi, "Characteristics of trace elements in PM 2.5 and PM 10 of Chifeng , northeast China : Insights into spatiotemporal variations and sources," *Atmos. Res.*, vol. 213, no. April, pp. 550–561, 2018.
- [22].E. Chianese, "PM 2 . 5 and PM 10 in the urban area of Naples : chemical composition , chemical properties and influence of air masses origin," *J. Atmos. Chem.*, vol. 76, pp. 151–169, 2019.