

Paparan terhadap Materi Partikulat Udara di Instalasi Pengelolaan Limbah Radioaktif

(Exposure to Airborne Particulate Matter in a Radioactive Waste Management Facility)

Ramadhani Amellia^{1*}, Tita Aisyah², Alzero Fakhri Anugrah³

¹Badan Riset dan Inovasi Nasional, Gedung B.J. Habibie, Jl. M.H. Thamrin No. 8, Jakarta Pusat 10340

²Institut Teknologi Indonesia, Jl. Raya Puspiptek, Kelurahan Setu, Kecamatan Setu, Kota Tangerang Selatan 15314

³Badan Riset dan Inovasi Nasional, Gedung B.J. Habibie, Jl. M.H. Thamrin No. 8, Jakarta Pusat 10340

Abstrak

Instalasi Pengelolaan Limbah Radioaktif (IPLR), yang mencakup Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR) dan Kanal Hubung Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas (KHIPSB3), memiliki potensi paparan partikulat udara akibat aktivitas mekanis, termal, transportasi, dan penyimpanan limbah radioaktif, yang dapat menjadi media transport kontaminan bila tidak dikendalikan. Penelitian ini dilakukan untuk mengevaluasi konsentrasi partikulat udara dan tingkat kontaminasi udara sebagai indikator keselamatan inhalasi pekerja di kedua fasilitas. Pemantauan partikulat dilakukan pada fraksi 0,3–10 µm menggunakan Fluke 985 Airborne Particle Counter pada tanggal 13 Agustus 2025 (IPLR) dan 9 April 2025 (KHIPSB3). Data jumlah partikulat dihitung rata-ratanya, dikonversi menjadi konsentrasi massa (mg/m³), dan dibandingkan dengan Nilai Ambang Batas (NAB) partikulat respirabel 2 mg/m³ sesuai Permenaker No. 5 Tahun 2018. Hasil menunjukkan seluruh ruangan di IPLR dan KHIPSB3 memiliki konsentrasi partikulat jauh di bawah NAB, dengan nilai tertinggi berada pada area proses seperti kompaksi, insinerasi, dan panel sementasi, sedangkan nilai di KHIPSB3 cenderung lebih rendah akibat kelembaban area kolam yang menurunkan suspensi partikulat. Pengukuran tingkat kontaminasi udara juga menunjukkan seluruh nilai α dan β berada jauh di bawah batas keselamatan yang ditetapkan fasilitas. Secara keseluruhan, kondisi udara di kedua instalasi berada dalam kategori aman, namun hasil penelitian menegaskan perlunya pemantauan partikulat dan kontaminasi udara secara berkala sebagai bagian dari upaya mempertahankan keselamatan radiasi dan higiene industri di fasilitas nuklir.

Kata Kunci : fluke 985, IPLR, KHIPSB3, limbah radioaktif, partikulat udara, paparan inhalasi

Abstract

The Radioactive Waste Management Installation (IPLR), comprising the Radioactive Waste Processing Installation (IPLR) and the Connecting Channel to the Interim Spent Fuel Storage (KHIPSB3), presents potential exposure to airborne particulate matter generated from mechanical, thermal, transport, and storage activities, which may act as carriers of contaminants if not properly controlled. This study aims to evaluate airborne particulate concentrations and air contamination levels as indicators of inhalation safety for workers in both facilities. Particulate monitoring was performed for the 0.3–10 µm size range using a Fluke 985 Airborne Particle Counter on 13 August 2025 (IPLR) and 9 April 2025 (KHIPSB3). The particle counts were averaged, converted into mass concentrations (mg/m³), and compared with the occupational exposure limit of 2 mg/m³ for respirable particulates as specified in the Ministry of Manpower Regulation No. 5 of 2018. The results indicate that all rooms in IPLR and KHIPSB3 exhibited particulate concentrations far below the regulatory limit, with the highest values observed in process areas such as compaction, incineration, and cementation panels. In contrast, particulate concentrations in KHIPSB3 were generally lower due to the high humidity near the spent-fuel pool, which reduces particulate suspension. Air contamination measurements further confirmed that both α and β activities remained well below the facility's safety thresholds. Overall, the air quality in both installations is classified

as safe; however, the findings highlight the importance of continuous monitoring of airborne particulates and air contamination as part of maintaining radiation protection and industrial hygiene in nuclear facilities.

Keyword : fluke 985, IPLR, KHIPSB3, airborne particulate matter, air contamination, inhalation exposure.

*Penulis Korespondensi. Telp: +62 852 64883364

Alamat E-mail : rama007@brin.go.id (Ramadhani Amellia)

1. Pendahuluan Latar Belakang

Instalasi Pengelolaan Limbah Radioaktif (IPLR), yang mencakup Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR) dan Kanal Hubung Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas (KHIPSB3), memiliki peran penting dalam memastikan pengelolaan limbah radioaktif berlangsung secara selamat dan terkendali (BAPETEN, 2013). Aktivitas pemindahan, pengolahan, dan penyimpanan limbah berpotensi menghasilkan partikulat udara, sehingga pemantauan konsentrasi partikulat diperlukan untuk menilai risiko paparan dan kemungkinan kontaminasi (ICRP, 1994).

Proses mekanik dan termal di IPLR seperti kompaksi, insinerasi, dan evaporasi dapat meningkatkan jumlah partikulat, sementara kondisi ventilasi dan kelembaban di KHIPSB3 juga dapat memicu pembentukan partikulat di area kerja (UNSCEAR, 2010). Meskipun sebagian besar partikulat bersifat non-radioaktif, partikulat respirabel tetap dapat menjadi media pengangkut kontaminan apabila terjadi abrasi material atau re-suspensi debu pada permukaan terkontaminasi (IAEA, 2006). Hal ini sejalan dengan temuan Setiawan (2019) yang menyatakan bahwa pemantauan kualitas udara pada fasilitas pengolahan limbah radioaktif merupakan langkah penting untuk mencegah akumulasi partikulat yang dapat meningkatkan risiko paparan internal bagi pekerja. Ukuran partikulat menentukan lokasi deposisi dalam sistem pernapasan: PM10 cenderung tertahan di saluran pernapasan atas, PM2.5 mencapai saluran pernapasan bawah, PM1 dapat masuk hingga alveolus, dan PM0.1 berpotensi terabsorpsi ke dalam aliran darah dan menyebar ke seluruh tubuh (UNSCEAR, 2010).

Kontaminasi udara dapat bersumber dari debu, korosi, aerosol kimia, maupun aktivitas pengolahan limbah (ILO, 2017). Untuk menjamin keselamatan pekerja, pemantauan partikulat harus dilakukan secara periodik dan dibandingkan dengan Nilai Ambang Batas sesuai regulasi higiene industri (Permenaker, 2018). Dengan demikian, kajian partikulat udara di IPLR dan KHIPSB3 menjadi penting sebagai indikator

efektivitas pengendalian kontaminasi serta upaya melindungi pekerja dari potensi paparan inhalasi (Amellia et al., 2023; BAPETEN, 2019).

Keterkaitan Penelitian dengan Rujukan Sebelumnya

Berbagai studi pemantauan partikulat di fasilitas nuklir menunjukkan potensi penyebaran kontaminan melalui aerosol mikroskopis (IAEA, 2018). Penelitian sebelumnya oleh Amellia et al. (2023) hanya mencakup gudang penyimpanan, sehingga belum mencakup area kerja aktif yang memiliki tingkat aktivitas lebih tinggi. Partikulat respirabel dapat meningkatkan risiko paparan internal terutama pada area dengan aktivitas tinggi. Faktor ventilasi, filtrasi, dan proses operasional memengaruhi variasi partikulat (UNSCEAR, 2010). Rahmawati dan Suryanto (2021) juga mencatat bahwa aktivitas mekanis berulang pada fasilitas industri dapat meningkatkan jumlah partikulat halus terutama ketika sistem ventilasi tidak bekerja secara optimal. Regulasi nasional mewajibkan pemantauan partikulat sebagai bagian dari pengendalian kontaminasi udara. Penelitian ini memperluas cakupan pemantauan ke IPLR dan KHIPSB3 untuk memperoleh gambaran lebih komprehensif.

Identifikasi Permasalahan

Aktivitas pengolahan dan penyimpanan limbah berpotensi menghasilkan partikulat yang meningkatkan risiko kontaminasi udara (IAEA, 2019). Variasi aktivitas pekerja dan proses mekanis dapat meningkatkan suspensi partikulat. Data sebelumnya belum mencakup seluruh area kerja aktif dan belum diketahui apakah nilainya memenuhi NAB. Selain itu, belum ada analisis perbandingan antara IPLR dan KHIPSB3 (Amellia et al., 2023). Karena itu diperlukan pemantauan lebih sistematis untuk evaluasi keselamatan.

Perumusan Masalah

Penelitian ini merumuskan karakteristik konsentrasi partikulat pada berbagai ruangan di IPLR serta profil partikulat di KHIPSB3 yang

memiliki kondisi lingkungan berbeda. Perlu dinilai apakah seluruh nilai berada di bawah NAB dan Tingkat Kontaminasi Udara (TKU) berada dalam batas aman sesuai dengan Batas Keselamatan Operasi Instalasi.

Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan menentukan konsentrasi partikulat udara pada ruangan kerja IPLR dan KHIPSB3, membandingkannya dengan NAB, mengidentifikasi ruangan dengan kecenderungan partikulat tinggi, serta menilai apakah TKU berada dalam batas aman sebagai dasar evaluasi keselamatan fasilitas.

Ruang Lingkup Kajian

Penelitian mencakup pengukuran partikulat 0,3–10 μm menggunakan Particle Counter pada ruangan kerja IPLR dan KHIPSB3. Analisis hanya pada konsentrasi partikulat berdasarkan fraksi ukuran 0,3–10 μm tanpa identifikasi radionuklida. Data berasal dari pemantauan di IPLR yang dilakukan pada 13 Agustus 2025 dan di KHIPSB3 pada 9 April 2025.

Gambaran Hasil yang Diperlukan

Penelitian diharapkan memberikan gambaran kuantitatif tingkat partikulat di setiap ruangan IPLR dan KHIPSB3, mengidentifikasi ruangan dengan nilai tertinggi dan terendah, serta memastikan kepatuhan terhadap NAB. Hasilnya juga digunakan untuk menilai efektivitas ventilasi dan pengendalian kontaminasi dan mendukung peningkatan keselamatan radiasi.

2. Teori Dasar

Limbah Radioaktif dan Pengelolaannya

Limbah radioaktif berasal dari kegiatan industri, penelitian, kedokteran nuklir, reaktor penelitian, hingga pengolahan bahan bakar bekas (IAEA, 2018). Pengelolaan limbah radioaktif harus mengikuti prinsip keselamatan untuk memastikan radionuklida tidak berpindah ke lingkungan atau menimbulkan paparan yang tidak terkendali (BAPETEN, 2013). Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (IPLR) menerapkan metode pemilahan, pengemasan, kompaksi, sementasi, insinerasi, evaporasi, dan pengolahan kimia untuk menurunkan volume serta bahaya limbah (IPLR, 2025). KHIPSB3 berfungsi sebagai fasilitas penyimpanan bahan bakar bekas berbasis kolam yang memerlukan pengawasan ketat terhadap kondisi fisik, ventilasi, dan kelembaban ruangan. Seluruh proses ini memiliki potensi menghasilkan partikulat, baik dari aktivitas mekanis maupun interaksi material dengan lingkungan.

Materi Partikulat Udara

Materi partikulat (particulate matter/PM) merupakan campuran partikulat padat dan cair berukuran mikrometer yang tersuspensi di udara. partikulat berukuran 0,3–10 μm termasuk kategori respirabel karena dapat masuk ke saluran pernapasan bagian bawah (UNSCEAR, 2010). Pada fasilitas industri atau laboratorium, partikulat dapat berasal dari debu, korosi logam, aerosol kimia, serta abrasi permukaan peralatan (ILO, 2017). Dalam konteks fasilitas nuklir, partikulat umumnya non-radioaktif tetapi dapat membawa radionuklida bila terjadi kontaminasi pada permukaan atau alat proses (IAEA, 2019). Karakteristik partikulat di udara dipengaruhi oleh ventilasi, mobilitas pekerja, proses operasional, dan kondisi lingkungan seperti suhu serta kelembaban (ISO, 2016). Prakoso (2020) menjelaskan bahwa kelembaban tinggi di ruangan tertutup dapat mempercepat deposisi partikulat berukuran besar sehingga konsentrasi aerosol yang terukur menjadi lebih rendah dibandingkan ruangan dengan tingkat kelembaban rendah.

Partikulat Respirabel dan Dampak Kesehatan

Partikulat respirabel memiliki potensi mencapai bronki hingga alveoli, sehingga dapat memicu berbagai gangguan pernapasan terutama pada pekerja yang terpapar secara terus-menerus (ICRP, 2015). Paparan jangka panjang terhadap partikulat, meskipun bersifat non-radioaktif, dapat menyebabkan iritasi mukosa, gangguan fungsi paru, dan stres pernapasan pada lingkungan kerja tertutup. Risiko menjadi lebih tinggi apabila partikulat tersebut membawa radionuklida, karena radionuklida yang terhirup dapat berakumulasi di jaringan dan meningkatkan dosis paparan internal (IAEA, 2019). Oleh karena itu, pengendalian partikulat merupakan bagian penting dalam pencegahan paparan internal pada sistem proteksi radiasi. Nurhayati et al. (2022) menegaskan bahwa partikulat non-radioaktif sekalipun dapat membawa kontaminan apabila terjadi kontak dengan permukaan atau material yang teraktivasi di area kerja radiasi.

Kontaminasi Udara pada Fasilitas Nuklir

Kontaminasi udara di fasilitas nuklir dapat terjadi melalui mekanisme re-suspensi debu, kebocoran sistem, korosi, proses mekanis, atau aktivitas pekerja (IAEA, 2006). Ruangan dengan aktivitas operasional intensif seperti pengolahan limbah cenderung memiliki jumlah partikulat lebih tinggi dibanding area administrasi atau penyimpanan. Pemantauan kontaminasi udara merupakan persyaratan regulasi keselamatan radiasi dan harus dilaksanakan secara rutin. Di

IPLR Tingkat Kontaminasi Udara daerah kerja dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Tingkat Kontaminasi Udara Daerah Kerja di IPLR

Deskripsi	Batasan
Daerah Kontaminasi Rendah	$\alpha < 0.6 \text{ Bq/m}^3$ dan $\beta < 6 \text{ Bq/m}^3$
Daerah Kontaminasi Sedang	$0.6 \leq \alpha < 6 \text{ Bq/m}^3$ dan $6 \leq \beta < 60 \text{ Bq/m}^3$

Adapun Tingkat Kontaminasi Udara daerah kerja di KHIPSB3 dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Tingkat Kontaminasi Udara Daerah Kerja di KHIPSB3

Deskripsi	Batasan
Radioaktivitas udara maksimum	$7 \text{ Bq/m}^3 (\alpha)$ dan $70 \text{ Bq/m}^3 (\beta, \gamma)$

Particle Counter (PC)

Particle Counter (PC) adalah instrumen yang menganalisis jumlah dan ukuran partikulat berdasarkan hamburan cahaya saat partikulat melewati sinar laser internal (Fluke, 2018). PC mampu mendeteksi ukuran partikulat dalam rentang mikrometer sehingga umum digunakan untuk pemantauan kualitas udara, ruang bersih, dan fasilitas industri. Pada fasilitas nuklir, PC digunakan untuk memantau tingkat partikulat respirabel pada ruangan kerja sebagai indikator potensi risiko kontaminasi udara. Data yang diperoleh menjadi dasar evaluasi keselamatan dan pengendalian ventilasi.

Regulasi dan Nilai Ambang Batas Partikulat

Paparan partikulat memiliki Standar Nilai Ambang Batas (NAB) yang dapat diterima oleh sistem pernapasan dalam batas waktu tertentu. Jika jumlah paparan yang diterima berada di atas NAB dan waktu terpapar, maka seseorang dapat menderita gangguan pernapasan. NAB paparan partikulat telah diatur dalam beberapa peraturan terkait yaitu Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 5 Tahun 2018 Tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja di Lingkungan Kerja, pada peraturan ini menetapkan Nilai Ambang Batas (NAB) respirabel partikulat tidak boleh melampaui 2 mg/m^3 . Berdasarkan SNI 19-0232-2005 Nilai Ambang Dosis (NAB) adalah standar faktor bahaya di tempat kerja sebagai pedoman pengendalian agar tenaga kerja masih dapat menghadapinya tanpa mengakibatkan penyakit atau gangguan kesehatan dalam pekerjaan sehari-hari untuk waktu tidak lebih dari 8 jam sehari atau 40 jam seminggu. Adapun berdasarkan

Standar Internasional ISO 14644-1:2015 mengenai ruang bersih dan lingkungan terkontrol terkait, khususnya tentang klasifikasi kebersihan udara berdasarkan konsentrasi partikulat dapat ditampilkan pada Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Kelas Kebersihan Partikulat Udara

ISO 14644-1:2015 Classification Number (N)	Maximum Concentration Limits (Particles/m ³)					
	0.1 µm	0.2 µm	0.3 µm	0.5 µm	1.0 µm	5.0 µm
ISO Class 1	10					
ISO Class 2	100	24	10			
ISO Class 3	1 000	237	102	35		
ISO Class 4	10 000	2 370	1 020	352	85	
ISO Class 5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	
ISO Class 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	296
ISO Class 7				352 000	83 200	2 950
ISO Class 8				3 520 000	832 000	29 500
ISO Class 9				35 200 000	8 320 000	293 000

3. Metodologi

Bahan Eksperimen/Percobaan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data partikulat udara yang diperoleh dari pengukuran menggunakan particulate counter Fluke-985 di fasilitas IPLR dan KHIPSB3. Pengukuran dilakukan pada beberapa ruangan kerja aktif yang memiliki karakteristik aktivitas, ventilasi, dan potensi pembentukan partikulat yang berbeda. Bahan pendukung lain mencakup formulir pencatatan lokasi, waktu pengukuran, serta perangkat komputer untuk pengolahan data menggunakan Microsoft Excel. Seluruh bahan dan instrumen dipilih untuk memastikan proses pemantauan berlangsung secara konsisten dan memenuhi persyaratan keselamatan kerja (IAEA, 2019).

Sistem Penggunaan Alat Ukur

Particulate counter Fluke-985 digunakan untuk mengukur jumlah dan ukuran partikulat $0,3-10 \mu\text{m}$ dengan prinsip hamburan cahaya (light scattering), dan menampilkan hasil dalam satuan counts/m^3 (Fluke, 2018). Baterai alat diisi selama 15 menit sebelum pengukuran untuk memastikan daya mencukupi. Pengukuran dilakukan pada ketinggian 150 cm dari lantai, mewakili tinggi pernapasan pekerja. Setiap titik sampling diukur sebanyak tiga kali untuk mendapatkan nilai yang stabil dan mengurangi variabilitas data. Hasil pengukuran disimpan di memori alat dan dicatat pada formulir pemantauan sebagai dasar proses analisis.

Teknik Eksperimen/Percobaan

Teknik pemantauan partikulat dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut:

- 1) Mengisi baterai Fluke-985 selama 15 menit.
- 2) Menentukan titik sampling pada setiap ruangan dengan mempertimbangkan posisi suplai udara, ketinggian alat, serta ketersediaan area aman untuk pengukuran.
- 3) Melakukan pengukuran pada ketinggian 150 cm dan mengulang pengukuran tiga kali pada setiap titik.

- 4) Menyimpan data pada alat dan mencatat waktu serta lokasi pengukuran pada formulir (counts/m³).
 - 5) Memindahkan data dari alat ke komputer untuk proses pengolahan selanjutnya.
- Prosedur ini diterapkan sama pada IPLR dan KHIPSB3 untuk menjaga konsistensi metode.

Rancangan Percobaan

Data yang disalin dari alat ke Microsoft Excel kemudian diolah dengan tahapan berikut:

- 1) Pengelompokan Data
Data dikelompokkan berdasarkan lokasi sampling sesuai formulir lapangan.
- 2) Perhitungan Rata-Rata
Nilai jumlah partikulat untuk setiap ukuran (0,3; 0,5; 1; 2; 5; 10 µm) dihitung rata-ratanya dari tiga kali pengulangan.
- 3) Perhitungan Volume Partikulat
Volume partikulat dihitung menggunakan rumus volume bola:

$$V = \frac{4}{3} \pi r^3$$

dengan r adalah jari-jari partikulat untuk tiap ukuran.

- 4) Perhitungan Konsentrasi Massa Partikulat
Konsentrasi massa dihitung dengan rumus:

$$m = \rho \cdot X \cdot V$$

Dengan:

- m = massa partikulat (mg/m³)
- ρ = densitas partikulat (1.506 kg/m³; semen Portland)
- X = jumlah partikulat (partikel/m³)
- V = volume partikulat (m³)

- 5) Penyusunan Tabel dan Rekapitulasi
Seluruh hasil konsentrasi dirangkum dalam tabel untuk memudahkan interpretasi.
- 6) Evaluasi terhadap NAB

Nilai konsentrasi akhir dibandingkan dengan Nilai Ambang Batas (NAB) partikulat respirabel sebesar 2 mg/m³ sesuai Peraturan Menteri Ketenagakerjaan No. 5 Tahun 2018. Ruangan dengan nilai relatif tinggi dipertimbangkan sebagai area yang memerlukan evaluasi terhadap potensi sumber partikulat dan efektivitas sistem ventilasi.

Data akhir disusun dalam bentuk tabel dan grafik untuk melihat pola distribusi partikulat antar-ruangan, yang digunakan sebagai dasar analisis terhadap kualitas udara dan potensi kontaminasi udara di fasilitas IPLR dan KHIPSB3.

4. Hasil dan Pembahasan Pemantauan Partikulat

Pemantauan partikulat udara dilakukan pada tanggal 13 Agustus 2025 untuk fasilitas IPLR dan 09 April 2025 untuk KHIPSB3 menggunakan particulate counter Fluke-985. Pengukuran dilakukan pada setiap ruangan dengan ketinggian 150 cm dari lantai. Parameter yang diukur meliputi konsentrasi partikulat berukuran 0,3 µm; 0,5 µm; 1 µm; 2 µm; 5 µm; dan 10 µm dalam satuan mg/m³.

Hasil Pengukuran Jumlah Partikulat

Hasil pengukuran jumlah partikulat yang telah dilakukan di IPLR dan KHIPSB3 dapat dilihat pada Tabel 4 dan Tabel 5.

Tabel 4. Jumlah Partikulat di IPLR

No	Lokasi	Jumlah Partikel (partikel/m ³)					
		0,3 µm	0,5 µm	1 µm	2 µm	5 µm	10 µm
1	Koridor Masuk Instalasi	215481642	27399854	1533626	380763	55946	215481642
2	Proteksi Radiasi	216201765	27407489	1494713	374449	53903	216201765
3	Kontrol Personil	205126581	25323494	1322466	306020	43024	205126581
4	Panel Sementasi	226156384	25997062	1515711	362114	46255	226156384
5	Batu Nuklir	221962992	25833920	1833480	584287	107048	221962992
6	Airlock Limbah Padat	267409552	44589280	5178707	2831864	949045	267409552
7	Pompa Evaporasi	234365930	30422907	2247283	748164	138031	234365930
8	Kompaksi	265177530	42683701	4430396	2059030	557121	265177530
9	Insinerator	261656533	42228928	3919236	1769015	454331	261656533

Tabel 5. Jumlah Partikulat di KHIPSB3

No	Lokasi	Jumlah Partikel (partikel/m ³)					
		0,3 µm	0,5 µm	1 µm	2 µm	5 µm	10 µm
1	Lobby	290972682	42424962	3162407	790308	67547	15711
2	Ruang Kendali Utama	256096181	31119089	2105286	370777	14243	2936
3	Ruang Ganti	259085904	33204258	2899706	951101	170337	71952
4	Koridor Kolam	241343610	27818502	1752422	360646	43905	15858
5	Ruang Purifikasi	244286490	28366402	1736416	283700	23935	6166
6	Koridor Kanal Utama	262069754	33873660	2229221	472393	50513	18208

Hasil pemantauan jumlah partikulat udara menunjukkan bahwa IPLR memiliki jumlah partikulat yang konsisten pada seluruh ruangan, terutama pada fraksi halus 0,3–0,5 µm yang mendominasi lebih dari 2×10⁸ partikulat/m³ di sebagian besar lokasi, dengan nilai tertinggi pada Airlock Limbah Padat (2,67x10⁸ partikel/m³ untuk 0,3 µm) akibat aktivitas bongkar muat yang intensif. Area proses seperti Kompaksi dan Insinerator juga menunjukkan jumlah partikulat lebih besar pada fraksi besar (5–10 µm), mencerminkan adanya aktivitas mekanis dan termal yang menghasilkan partikulat kasar. Sebaliknya, KHIPSB3 memiliki jumlah partikulat lebih rendah, terutama pada fraksi besar, akibat kelembaban tinggi di area kolam yang menurunkan kemampuan partikulat untuk tetap tersuspensi di udara. Ruangan dengan mobilitas tinggi seperti Lobby dan Ruang Ganti

menunjukkan jumlah partikulat halus lebih tinggi dibanding area dekat kolam yang relatif stabil. Secara keseluruhan, pola sebaran partikulat di kedua fasilitas mencerminkan karakteristik aktivitas masing-masing area, dan tidak ditemukan indikasi peningkatan partikulat yang dapat mengarah pada potensi kontaminasi udara.

Hasil Pengukuran Konsentrasi Partikulat

Proses perhitungan konsentrasi partikulat dimulai dengan menghitung nilai rata-rata jumlah partikulat per meter kubik udara ($\text{partikulat}/\text{m}^3$) dari tiga kali pengulangan pengukuran yang dilakukan di setiap titik sampling. Selanjutnya, nilai rata-rata jumlah partikulat tersebut dikonversi menjadi konsentrasi massa partikulat (dinyatakan dalam mg/m^3) dengan cara mengalikannya dengan nilai massa semen per partikulat, perhitungan konversi ini dilakukan secara terpisah untuk setiap ukuran partikulat yang berbeda. Setelah didapatkan konsentrasi akhir (mg/m^3) untuk setiap partikulat, nilai tersebut kemudian dibandingkan dengan batasan Nilai Ambang Batas (NAB) yang berlaku untuk mengevaluasi kepatuhan lingkungan kerja, dan hasil pengukuran konsentrasi partikulat di IPLR dan KHIPSB3 disajikan lengkap dalam Tabel 6 dan 7.

Tabel 6. Pengukuran Konsentrasi Partikulat di IPLR

No	Nama	Konsentrasi Partikulat Debu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
		0,3 μm	0,5 μm	1 μm	2 μm	5 μm	10 μm
1	Koridor Masuk Instalasi	0,0045	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043
2	Proteksi Radiasi	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046
3	Kontrol Personil	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043	0,0043
4	Panel Sementasi	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046	0,0046
5	Binatu Nuklir	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047	0,0047
6	Airlock Limbah Padat	0,0056	0,0056	0,0056	0,0056	0,0056	0,0056
7	Pompa Evaporasi	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049	0,0049
8	Kompaksi	0,0056	0,0056	0,0056	0,0056	0,0056	0,0056
9	Insinerator	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055	0,0055

Tabel 7. Pengukuran Konsentrasi Partikulat di KHIPSB3

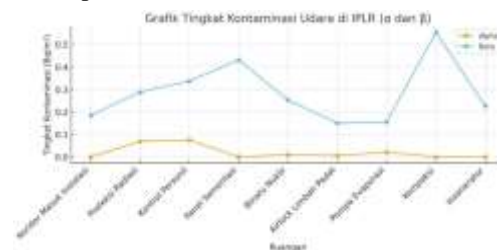
No	Nama	Konsentrasi Partikulat Debu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
		0,3 μm	0,5 μm	1 μm	2 μm	5 μm	10 μm
1	Lobby	0,0061	0,0041	0,0024	0,0049	0,0066	0,0123
2	Ruang Kendali Utama	0,0054	0,0050	0,0016	0,0023	0,0013	0,0023
3	Ruang Ganti	0,0055	0,0032	0,0022	0,0050	0,0166	0,0566
4	Koridor Kolam	0,0053	0,0027	0,0013	0,0022	0,0042	0,0124
5	Ruang Purifikasi	0,0051	0,0027	0,0013	0,0017	0,0023	0,0048
6	Koridor Kanal Utama	0,0055	0,0053	0,0017	0,0029	0,0049	0,0143

Hasil pemantauan partikulat udara di IPLR menunjukkan bahwa seluruh ruangan memiliki konsentrasi partikulat pada rentang 0,3–10 μm yang berada jauh di bawah NAB, dengan pola dominan pada fraksi halus 0,3–0,5 μm . Ruangan proses seperti Kompaksi, Insinerator, dan Panel Sementasi menunjukkan

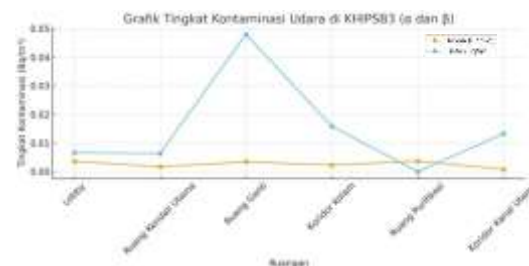
nilai sedikit lebih tinggi, namun tetap aman dan terkendali karena peningkatan tersebut sesuai karakteristik proses mekanis dan termal. Ruang nonproses seperti Proteksi Radiasi, Kontrol Personil, dan Koridor Masuk menunjukkan nilai paling stabil pada seluruh fraksi ($\pm 0,0043$ – $0,0046$ mg/m^3), menandakan efektivitas ventilasi dan minimnya sumber partikulat. Pada KHIPSB3, nilai partikulat secara umum lebih rendah dibanding IPLR, terutama pada fraksi besar, karena kondisi kelembaban tinggi di area kolam menghambat suspensi debu. Ruang dengan mobilitas tinggi seperti Lobby dan Ruang Ganti menunjukkan nilai sedikit lebih besar pada fraksi halus (0,0055– $0,0061$ mg/m^3), sedangkan area dekat kolam memiliki konsentrasi paling rendah dan stabil. Secara keseluruhan, kedua fasilitas tidak menunjukkan indikasi kontaminasi udara, seluruh nilai berada di bawah batas yang dipersyaratkan, dan variasi antar-ruangan masih dalam kisaran normal sesuai karakteristik aktivitas operasional masing-masing area. Lestari (2018) menekankan bahwa meskipun konsentrasi partikulat berada jauh di bawah NAB, fasilitas tetap diwajibkan melakukan pemantauan berkala sebagai bagian dari upaya mempertahankan keselamatan dan kebersihan udara kerja

Pengukuran Tingkat Kontaminasi Udara

Tingkat kontaminasi udara di IPLR perlu dianalisis demi menjamin keselamatan kerja. Pemantauan dilakukan pada Agustus 2025 untuk IPLR dan April untuk KHIPSB3. Tingkat kontaminasi udara di IPLR dan KHIPSB3 dapat dilihat pada Gambar 1 dan 2.



Gambar 1. Tingkat Kontaminasi Udara di IPLR



Gambar 2. Tingkat Kontaminasi Udara di KHIPSB3

Hasil pengukuran tingkat kontaminasi udara menunjukkan bahwa IPLR memiliki kontaminasi β lebih dominan dibanding α , dengan nilai tertinggi ditemukan pada area Kompaksi ($0,5528 \text{ Bq/m}^3$), Panel Sementasi ($0,4303 \text{ Bq/m}^3$), dan Kontrol Personil ($0,3368 \text{ Bq/m}^3$), mencerminkan aktivitas pengolahan limbah yang berpotensi menghasilkan debu terkontaminasi. Nilai kontaminasi α umumnya sangat rendah dan hanya muncul pada beberapa area seperti Proteksi Radiasi dan Kontrol Personil, mengindikasikan minimnya sumber pemancar alfa di lingkungan kerja. Sementara itu, KHIPSB3 menunjukkan tingkat kontaminasi yang jauh lebih rendah, baik untuk α maupun β , dengan seluruh nilai berada di bawah $0,01 \text{ Bq/m}^3$ kecuali pada Ruang Ganti dan Koridor Kolam yang memiliki sedikit kenaikan kontaminasi β akibat pergerakan pekerja dan aerosol dari area kolam. Secara keseluruhan, kedua fasilitas masih berada pada kategori aman karena seluruh nilai kontaminasi udara berada jauh di bawah batas keselamatan yang dipersyaratkan, sehingga tidak ditemukan indikasi risiko paparan internal yang signifikan bagi pekerja.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pemantauan partikulat udara dan tingkat kontaminasi udara pada fasilitas IPLR dan KHIPSB3, dapat disimpulkan bahwa seluruh ruangan pada kedua instalasi menunjukkan konsentrasi partikulat berukuran $0,3\text{--}10 \mu\text{m}$ yang berada jauh di bawah Nilai Ambang Batas (NAB) sebagaimana ditetapkan dalam Permenaker No. 5 Tahun 2018. Fasilitas IPLR cenderung memiliki jumlah partikulat lebih tinggi dibanding KHIPSB3, terutama pada ruangan dengan aktivitas mekanis dan termal seperti Kompaksi, Insinerator, dan Panel Sementasi, namun nilai tersebut tetap berada dalam batas aman dan tidak menunjukkan indikasi peningkatan paparan yang signifikan. Sebaliknya, kondisi kelembaban tinggi di KHIPSB3 menyebabkan nilai partikulat lebih rendah dan stabil, khususnya pada fraksi partikulat berukuran besar.

Pengukuran tingkat kontaminasi udara menunjukkan bahwa kontaminasi β pada IPLR relatif lebih tinggi daripada α , terutama pada area proses, namun seluruh nilai masih berada jauh di bawah batas kontaminasi yang dipersyaratkan dalam regulasi keselamatan radiasi. KHIPSB3 menunjukkan tingkat kontaminasi udara yang sangat rendah untuk kedua parameter α dan β . Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa sistem ventilasi, pengendalian kontaminasi, serta prosedur keselamatan yang diterapkan di IPLR dan KHIPSB3 berjalan efektif dan mampu menjaga

kualitas udara kerja tetap aman bagi pekerja. Temuan ini dapat menjadi dasar evaluasi berkelanjutan untuk peningkatan kebersihan udara dan penguatan program proteksi radiasi di kedua fasilitas.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan apresiasi dan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam pelaksanaan penelitian ini. Ucapan terima kasih disampaikan kepada Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) atas fasilitas, akses data, serta dukungan teknis selama proses pengambilan dan pengolahan data. Penulis juga berterima kasih kepada tim IPLR dan KHIPSB3 yang telah membantu dalam pelaksanaan pemantauan partikulat serta menyediakan informasi operasional yang diperlukan. Tidak lupa, penghargaan diberikan kepada rekan-rekan laboratorium dan pihak lain yang turut serta memberikan bantuan, diskusi, dan masukan hingga makalah ini dapat diselesaikan dengan baik. Semoga hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi bagi peningkatan keselamatan dan pengelolaan lingkungan kerja di fasilitas nuklir.

Daftar Simbol

C_p	= konsentrasi partikulat, mg/m^3
X	= jumlah partikulat, partikulat/ m^3
V	= volume partikulat, m^3
r	= jari-jari partikulat, μm
π	= konstanta pi (3,14)
ρ	= densitas partikulat, kg/m^3
d_p	= diameter partikulat, μm
TKU	= tingkat kontaminasi udara, Bq/m^3
α	= aktivitas pemancar alfa, Bq/m^3
β	= aktivitas pemancar beta, Bq/m^3
NAB	= nilai ambang batas partikulat respirabel, mg/m^3
PM	= particulate matter (materi partikulat)
t	= waktu pengukuran, menit
h	= ketinggian titik pengukuran m
PC	= particle counter (alat penghitung partikulat)

Daftar Pustaka

- [1] BAPETEN. Peraturan Kepala Badan Pengawas Tenaga Nuklir Nomor 4 Tahun 2013 tentang Proteksi dan Keselamatan Radiasi dalam Pemanfaatan Tenaga Nuklir. Badan Pengawas Tenaga Nuklir. 2013.
- [2] ICRP. Human Respiratory Tract Model for Radiological Protection (ICRP Publication 66). International Commission on Radiological Protection. 1994.
- [3] Direktorat Pengelolaan Fasilitas Ketenaganukliran. Laporan Analisis

- Keselamatan Instalasi Pengolahan Limbah Radioaktif (No. B-5/IV/LT/1/2022). Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). 2025.
- [4] UNSCEAR. Sources and Effects of Ionizing Radiation. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2010.
- [5] IAEA. Radiological Contamination Control. International Atomic Energy Agency. 2006.
- [6] Setiawan A. Evaluasi Kualitas Udara pada Fasilitas Pengolahan Limbah Radioaktif. Jurnal Teknologi Nuklir Indonesia. 2019.
- [7] ILO. Occupational Exposure to Airborne Particulates in the Workplace. International Labour Organization. 2017.
- [8] Permenaker. Peraturan Menteri Ketenagakerjaan Nomor 5 Tahun 2018 tentang Keselamatan dan Kesehatan Kerja Lingkungan Kerja. Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia. 2018.
- [9] Amellia R, dkk. Exposure to Airborne Particulate Matter in the Radioactive Waste Storage Facility. Prosiding Konferensi IAEA tentang Pengelolaan Limbah Radioaktif. Radioactive Waste Management Installation – Directorate of Nuclear Facility Management, BRIN; hlm. 1–8. 2023.
- [10] IAEA. Monitoring and Surveillance of Radioactive Facilities. International Atomic Energy Agency. 2018.
- [11] Rahmawati D, Suryanto A. Analisis Variasi Partikulat di Lingkungan Industri Berdasarkan Perubahan Ventilasi. Jurnal Keselamatan Kerja Indonesia. 2021.
- [12] Prakoso H. Pengaruh Kelembaban terhadap Konsentrasi Aerosol di Ruang Tertutup. Jurnal Lingkungan dan Energi. 2020.
- [13] IAEA. Radiation Protection and Monitoring in Nuclear Facilities. International Atomic Energy Agency. 2019.
- [14] Nurhayati S, Putra D, Laksana R. Karakteristik Partikulat Non-Radioaktif sebagai Media Pembawa Kontaminan. Jurnal Kesehatan Radiasi. 2022.
- [15] ISO. ISO 14644-1: Cleanroom and Associated Controlled Environments—Classification of Air Cleanliness by Particle Concentration. International Organization for Standardization. 2015.
- [16] Fluke. Fluke 985 Airborne Particle Counter: User Manual. Fluke Corporation. 2018.
- [17] SNI. SNI 19-0232-2005: Nilai Ambang Dosis Faktor Bahaya di Tempat Kerja. Badan Standardisasi Nasional. 2005.
- [18] UNSCEAR. Airborne Particulate Behavior and Deposition in Occupational Settings. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2016.
- [19] UNSCEAR. Exposure Assessment in Controlled Facilities. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. 2021.
- [20] Lestari M. Evaluasi Kebersihan Udara Kerja pada Fasilitas Industri Berisiko Tinggi. Jurnal Higiene dan K3. 2018.
- [21] Pusat Teknologi Limbah Radioaktif. Laporan Analisis Keselamatan Kanal Hubung – Instalasi Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Nuklir Bekas (KH-IPSB3). Nomor P.001/KN 00 01/TLR 3. 2018.