

ESTIMASI *INHALATION EXPOSURE CONCENTRATION* (IEC) PARTIKULAT TERESPIRASI DAN BLACK CARBON DI KAWASAN INDUSTRI KOTA BANDUNG, KAB.BANDUNG BARAT DAN CIMAH

NOVI FITRIA^{1,2*}, MARCELINA JELSIH¹, AGIE ADHITYA GUNAWAN¹, TINY AGUSTINI KOESMAWATI^{1,2}

1. Program Studi S1 Kimia, Sekolah Tinggi Analis Bakti Asih Bandung
2. Sekretariat Utama, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Jakarta
email: novi.fitria@brin.go.id

ABSTRAK

Salah satu dampak dari aktivitas industri adalah pencemaran udara ambien akibat paparan partikulat terespirasi dan Black Carbon (BC) yang berdampak pada kesehatan pekerjaannya. Penelitian ini dilakukan di Kawasan Industri Kota Bandung, Kab. Bandung Barat dan Cimahi di lima (5) lokasi titik sampling yaitu Cibereum, Cimahi, Padalarang, Bandung Wetan dan Buahbatu. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis kualitas udara di area tersebut berdasarkan indeks ISPU dan *Inhalation Exposure Concentration* (IEC) dari TSP, PM₁₀, PM_{2.5} dan BC. IEC dihitung sebagai potensi paparan partikulat terespirasi dan BC kepada pekerja melalui jalur inhalasi. Studi ini membuktikan bahwa di Kawasan Industri di Kota Bandung, Kab. Bandung Barat dan Cimahi mengandung BC rentang 0,90-1,65 µg/m³. Sedangkan tingkat pencemaran udara untuk PM_{2.5} di kawasan industri, daerah Bandung Wetan berada dikategori "Sedang" dan daerah Buahbatu menunjukkan kategori "Tidak Sehat". Hasil perhitungan IEC diketahui bahwa bagi pekerja outdoor dan masyarakat di kawasan industri di Kota Bandung, Kab. Bandung Barat dan Cimahi terpapar IEC TSP berkisar 10,29-36,99 µg/m³; IEC PM₁₀ berkisar 6,65-34,69 µg/m³; IEC PM_{2.5} antara 2,24-19,83µg/m³ dan BC ada di rentang 0,20-0,36µg/m³. PM_{2.5} dan PM₁₀ berkorelasi positif dengan TSP dengan nilai korelasi berturut-turut $r = 0,999$ dan $r = 0,909$.

Kata kunci: partikulat terespirasi, black carbon (BC), *Inhalation Exposure Concentration* (IEC)

ABSTRACT

The impacts of industrial activities are ambient air pollution due to exposure to inhaled particulates and Black Carbon (BC) which has an impact on the health of its workers. This research was conducted in the Industrial District of Bandung City, District West Bandung and Cimahi in five (5) sampling point locations, specifically Cibereum, Cimahi, Padalarang, Bandung Wetan and Buahbatu. The purpose of this study was to analyze the air quality in these areas based on the ISPU index and *Inhalation Exposure Concentration* (IEC) from TSP, PM₁₀, PM_{2.5} and BC. IEC was calculated as the potential exposure of respiratory particulates and BC to workers through the inhalation route. This study proves that the Bandung City, District West Bandung and Cimahi Industrial Estates contain BC in the range 0.90-1.65 g/m³. While the level of air pollution for PM_{2.5} in industrial areas, the Bandung Wetan area was in the "Medium" category and the Buahbatu area shows the "Unhealthy" category. The results of the IEC calculation show that outdoor workers and people in industrial areas in Bandung and Cimahi are exposed to IEC TSP in the range of 10.29-36.99 µg/m³; IEC PM₁₀ ranged from 6.65-34.69 µg/m³; IEC PM_{2.5} was between 2.24-19.83 µg/m³ and BC was in the range of 0.20-0.36µg/m³. PM_{2.5} and PM₁₀ were positively correlated with TSP with correlation values of $r = 0,999$ and $r = 0.909$, respectively.

Keywords: inhaled particulates, black carbon (BC), *Inhalation Exposure Concentration* (IEC)

1. PENDAHULUAN

Pencemaran udara didefinisikan sebagai penurunan kualitas udara akibat masuknya beberapa komponen ke dalam udara ambien dalam jumlah tertentu hingga menyebabkan masalah kesehatan seperti gangguan pernafasan (Duppa dkk., 2020; Rahman dkk., 2021). Parameter kualitas udara ambien yang sering dipantau pada udara ambien adalah Carbon Monoksida (CO), Sulfur Dioksida (SO₂), Nitrogen Dioksida (NO₂) Partikulat Matter (PM_{2,5} dan PM₁₀) dan Total Suspended Partikulat (TSP) (Alfiah & Yuliawati, 2018; Wulansari dkk., 2016). TSP sendiri mengandung beberapa komponen atau unsur kimia yang apabila terhirup oleh manusia dalam jangka waktu yang lama dapat mempengaruhi kesehatan. Unsur kimia yang terkandung dalam TSP bisa meliputi berbagai logam berat seperti Pb, Al, Mn, dan Zn (Ali dkk., 2012; Kang dkk., 2009). Di India, kawasan industri di daerah Mitaphur, Gujarat terbukti mengandung logam berat seperti (Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb and Zn) dalam TSP dengan konsentrasi (211,3 hingga 375,2 µg/m³) 2 hingga 3 kali melebihi baku mutu yang diperbolehkan (Basha dkk., 2010).

Selain unsur kima anorganik seperti logam berat, unsur kimia organik seperti karbon hitam/*black carbon* (BC) juga dapat terkandung dalam TSP. BC disebut juga sebagai karbon pirogenik atau residu arang didefinisikan sebagai campuran biomassa dan produk pembakaran tidak sempurna dari bahan bakar fosil seperti batu bara (Liu & Han, 2021). Oleh karena itu, keberadaan TSP dalam polusi udara memberikan efek kesehatan yang merugikan karena dapat terserap ke dalam jaringan paru-paru ketika manusia bernapas. Terlebih lagi, kandungan beberapa logam berat dalam berbagai bentuk dalam partikulat ini dapat terhirup atau tertelan, sehingga dapat memberikan bahaya kesehatan yang serius (Basha dkk., 2010; Rita dkk., 2016). Bahkan di lingkungan fasilitas pelayanan kesehatan, partikulat terespirasi dapat beresiko menyebarkan *airbone disease* (Fitria dkk., 2020)

Di Indonesia, hasil kajian karakteristik materi partikulat di Jakarta menunjukkan sejak 2010 hingga 2019 kandungan PM_{2,5} melebihi baku mutu yang ditetapkan dan cenderung naik setiap tahunnya serta mengandung BC dan sulfur hingga 39% (Santoso dkk., 2020). Tentu saja hal ini akan mengganggu kesehatan masyarakat terutama di bagian pernafasan. Konsentrasi paparan yang terhirup atau *Inhalation Exposure Concentration* (IEC) dapat dihitung dalam satuan mg/m³ atau µg/m³. Di kawasan perkotaan Vellore, India, nilai IEC TSP terhitung 101 µg/m³ di hari kerja dan terdeteksi sebesar 119,88 µg/m³ di akhir pekan (Manojkumar & Srimuruganandam, 2021). Sedangkan kajian (Bista dkk., 2022) membuktikan paparan *exposure* BC yang terhirup oleh pengguna jalanan di Paris berada pada rentang 0,25 - 2,2 µg/m³ tergantung dari moda transportasi yang digunakan. Kajian estimasi *inhalation exposure concentration* yang melibatkan partikulat terespirasi dan unsur kimia di kawasan Industri di Kota Bandung dan Cimahi masih sangat terbatas. Oleh karena itu pada studi ini dilakukan analisis PM_{2,5} PM₁₀, TSP serta *Black Carbon* udara ambien di kawasan industri dan penilaian estimasi IEC terhadap kesehatan pekerja di kawasan industri.

2. METODE

Jenis penelitian yang dilakukan adalah kuantitatif dengan desain penelitian deskriptif studi kasus dan *cross sectional study*. Dengan definisi operasional yang tersedia pada Tabel 1. Lokasi sampling dilakukan di lima (5) lokasi yang berbeda di Kota Bandung dan Kota Cimahi sesuai dengan rekomendasi Laboratorium Pengendalian Kualitas Lingkungan PDAM Tirtawening Kota Bandung. Sedangkan analisis TSP dan *Black Carbon* (BC) dilakukan di Laboratorium Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan, Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN).

Tabel 1. Defini Operasional

Kelompok studi	Data Primer	Metode	Satuan	Data Sekunder	Satuan
Studi Kasus Kawasan Industri :	Partikulat terespirasi PM _{2,5} , PM ₁₀	<i>Met One</i> (digital)	µg/Nm ³	<ul style="list-style-type: none"> Suhu Kelembaban Kecepatan angin 	<ul style="list-style-type: none"> °C % m/detik
Lokasi No.1-4 di Kota Bandung dan Kabupaten bandung barat serta lokasi No.5 di Kota Cimahi	<i>Total Suspended Particulate</i> (TSP) <i>Black Carbon</i> (BC)	<i>High Volume Air Sampler</i> (HVAS) <i>EEL Smoke Stain Reflectometer</i>	µg/Nm ³ µg/cm ² dikonversi ke µg/m ³	<ul style="list-style-type: none"> Tekanan udara Kategori ISPU Luas permukaan Volume udara 	<ul style="list-style-type: none"> kpa (cm²) (m³)
	Nilai <i>Inhalation Exposure</i> partikulat terespirasi dan <i>Black Carbon</i> (BC)	IEC	µg/m ³	<ul style="list-style-type: none"> C_{udara} EF AcT ED 	<ul style="list-style-type: none"> (µg/m³) (hari/tahun) (jam/hari) (tahun)

2.2 Alat dan Bahan

Alat yang digunakan untuk pengambilan sampel partikulat adalah : a) *High Volume Air Sampler* (HVAS) untuk mengukur partikulat di udara ambien dengan metode gravimetri; b) alat digital *Met One* untuk mengukur partikulat terespirasi di udara ambien; c) neraca analitik untuk menimbang filter sebelum dan sesudah sampling; d) termometer untuk mengukur suhu; e) barometer digunakan untuk mengukur tekanan udara di luar ruangan; f) anemometer digunakan untuk mengukur arah angin; g) *EEL smoke stain reflectometer* untuk analisis *Black Carbon* (BC); i) *stopwatch*, kabel roll, pinset, aluminium foil, gunting. Bahan yang dipakai adalah filter kertas Whatman berbentuk bulat berdiameter 9,6 cm ukuran pori-pori 2 µm dengan porositas 0,3-0,45 µm.

2.3 Prinsip HVAS dan Perhitungan *Total Suspended Particulate* (TSP)

High Volume Air Sampler (HVAS) merupakan alat sampling partikulat di udara ambien yang memiliki prinsip kerja dengan sistem vakum yang mampu menarik udara di lingkungan sekitar melalui inlet dengan ukuran-selektif dan melalui filter berukuran 20,3 x 25,4 cm (8" x 10") pada laju alir 1,132 liter/menit. Standard US-EPA (*United States Environmental Protection Agency*) alat sampling yang digunakan memiliki bentuk yang besar (45,5" x 22,5" x 20") dan berat sekitar 15-20 kg (Budiarto, 2014). Perhitungan TSP menggunakan prinsip gravimetri, pertama kita menghitung volume udara dengan rumus (1) sebagai berikut :

$$V = \frac{(F1+F2)}{2} \times t \times \frac{pa}{Ta} \times \frac{298}{101,3} \dots\dots\dots(1)$$

Dimana : V = volume udara yang dihisap (m³); F1 = laju alir awal (m³/menit); F2 = laju alir akhir (m³/menit); t = waktu pengambilan contoh uji (menit); pa = tekanan rata-rata barometer selama pengambilan contoh uji (kPa); Ta= temperatur selama pengambilan contoh uji (K); 298 : kondisi normal 25 °C atau 298 K; 101,3 = tekanan pada kondisi normal 1 atm (kPa). Setelah diketahui volume udaranya maka nilai V dimasukkan dalam rumus (2) berikut :

$$C = \frac{(W2-W1)}{V} \times 10^6 \dots\dots\dots(2)$$

Dimana : C = konsentrasi partikulat ($\mu\text{g}/\text{Nm}^3$); W1 = berat filter sebelum pengambilan contoh udara (g); W2 = berat filter sesudah pengambilan contoh udara (g); V = volume udara yang dihisap (m^3); 10^6 = konversi g ke μg .

2.4 Prinsip EEL *Smoke Stain Reflectometer* dan Perhitungan Konsentrasi BC

Pengukuran BC menggunakan alat *smoke stain reflectometer* merupakan pengukuran dengan metode reflektansi, dimana cahaya yang direfleksikan atau diserap pada filter sampel bergantung pada konsentrasi partikel, densitas, refraksi indeks dan ukuran (Atmodjo, D. P. D., Kusmartini, I., & Kurniawati, 2015) dengan rumus (3) berikut :

$$BC \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{cm}^2}\right) = \{100/(2\varepsilon)\} \ln[R_0/R] \dots\dots\dots(3)$$

Dimana : BC adalah *black carbon* dengan satuan ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$); R_0 = nilai reflektan dari filter kosong (=100) dan R adalah nilai reflektan dari filter sampel (%). Nilai reflektan dari filter sampel merupakan nilai yang sebanding dengan BC pada filter. Untuk nilai $\varepsilon = 5,27\text{m}^2/\text{g}$. Setelah mendapatkan nilai BC dengan satuan $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ dari alat, maka dikonversi perhitungan dengan rumus (4) sebagai berikut :

$$BC \left(\frac{\mu\text{g}}{\text{m}^3}\right) = A/V * BC(\mu\text{g}/\text{cm}^2) \dots\dots\dots(4)$$

Dimana : BC adalah *black carbon* dengan satuan ($\mu\text{g}/\text{m}^3$); A = luas area sampel (cm^2); V = volume sampling (m^3).

2.5 Prinsip *Met One Digital* dan Perhitungan $\text{PM}_{2,5}$ dan PM_{10}

Pada studi ini $\text{PM}_{2,5}$ dan PM_{10} diukur dengan menggunakan *Met One Aerocet-531S Mass Particle Counter/Dust Monitor* secara otomatis. Prinsipnya adalah menghitung partikel individu menggunakan sinar laser yang tersebar dan menghitung konsentrasi massa ekuivalen menggunakan algoritme. Satuan $\text{PM}_{2,5}$ dan PM_{10} yang terukur adalah $\mu\text{g}/\text{Nm}^3$. Alat sebelum digunakan dicek tanggal kalibrasi dan masih dalam kondisi yang layak pakai.

2.6 Penilaian *Inhalation Exposure Concentration (IEC)*

Kualitas udara yang rendah tentu saja akan berisiko terhadap pekerja, terutama pekerja yang berada di luar ruangan (*outdoor*) di kawasan industri. Bekerja dengan terpapar udara yang mengandung komponen berbahaya selama mereka bekerja dapat dihitung dengan mengestimasi IEC yang harus tercermin dalam penyesuaian parameter paparan. Perhitungan estimasi IEC merujuk pada (US EPA, 2009; Wang dkk., 2019) yang merekomendasikan bahwa saat memperkirakan risiko melalui inhalasi, penilai risiko harus menggunakan konsentrasi bahan kimia di udara sebagai metrik paparan. Rumus (5) yang digunakan untuk mengetahui jumlah rata-rata paparan yang terhirup oleh orang dewasa per harinya tanpa menganalisis risikonya adalah sebagai berikut :

$$\text{Inhalation Exposure Concentration (IEC)} (\mu\text{g}/\text{m}^3) = \frac{C_p \times \text{AcT} \times \text{EF} \times \text{ED}}{\text{AT} \times 365 \times 24} \dots\dots\dots(5)$$

Dimana : C_p ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) = konsentrasi polutan di udara; AcT (jam/hari) = *Activity Time* ditentukan untuk kegiatan bekerja *outdoor* nilainya adalah 12,7 jam/hari; EF (hari/tahun) ditetapkan 350 hari = *Exposure frequency*; elemen lama durasi terpapar yaitu ED dalam satuan tahun berdasarkan (US EPA, 2009) ED ditentukan 30 tahun untuk dewasa, dan *averaging time* (AT) adalah 70 tahun untuk polutan yang bersifat karsinogenik.

3.HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian dilakukan di lima lokasi kawasan industri daerah Kota Bandung, Kab. Bandung barat dan Kota Cimahi. Penentuan titik sampling dilakukan berdasarkan SNI 19-7119.6-2005 dan keterangan lokasi sampling tersedia pada Tabel 2. Dari hasil analisis kandungan PM_{2,5}, PM₁₀, dan TSP selama sampling selama 1 (satu) jam di kelima lokasi, diketahui bahwa konsentrasi TSP pada setiap lokasi sampling bervariasi dengan rentang 47,3-170,1 µg/Nm³. Sedangkan pada PM₁₀ dan PM_{2,5} masing-masing rentangnya adalah 30,6-159,5 µg/Nm³ dan 10,3-91,2 µg/Nm³. Hasil perhitungan konsentrasi kemudian disesuaikan dengan lama paparan yang mengacu pada ISPU, dengan rumus perhitungan berikut :

$$C_2 = C_1 \left(\frac{t_1}{t_2}\right)^p \dots\dots\dots(6)$$

Dimana : C1 = konsentrasi udara rata-rata sesaat (µg/Nm³); C2 = konsentrasi udara rata-rata standar; t1 = waktu paparan sesaat (jam); t2 = waktu paparan standar (jam); p = faktor konversi dengan nilai antara 0,17-0,2. Hasil konversi tersedia pada Tabel 3. Pada kajian ini diambil nilai konversi 0,17. Konsentrasi tertinggi PM_{2,5}, PM₁₀ dan TSP berada di Buahbatu, hal ini dapat disebabkan mobilitas keluar masuk kendaraan ke kawasan industri yang lebih tinggi dibandingkan dengan lokasi lainnya dan juga Kondisi cuaca yang lebih cerah dan kering, menyebabkan tanah menjadi lebih mudah terbawa angin dan berkontribusi selama pengukuran (Arditsoglou & Samara, 2005).

Tabel 2. Lokasi Sampling dan Kondisi Lingkungannya

Titik Koordinat	Suhu °C	Kelembaban %	Kecepatan Angin m/detik	Tekanan kPa
Cibeureum S06°54'06.2' / E107°33'48.2'	27 °C Cuaca mendung	66	2	93,14
Cimahi S06°54'27.2' / E107°32'46.4'	28 °C Cuaca mendung	65	2	93,25
Padalarang S06°51'45.5' / E107°29'46.5'	27 °C Cuaca mendung	65	1	99,63
Bandung Wetan S06°54'22.9' / E107°36'49.2'	27,9 °C Cuaca mendung	75	0,48	93,54
Buahbatu S06°57'23.33' / E107°39'41.0'	29,9 °C Cuaca cerah	59	0,72	93,63

Kelembaban yang terukur pada saat sampling berkisar antara 59-75%. Buahbatu merupakan kawasan industri yang terendah kelembabannya yaitu 59% dengan suhu tertinggi yaitu 29,9°C dan kondisi saat sampling juga cerah.

Tabel 3. Hasil Pengukuran PM2.5, PM10, dan TSP Sebelum dan Sesudah Konversi

Titik Sampel	PM2.5 (µg/m ³)		PM10 (µg/m ³)		TSP (µg/m ³)	
	1 Jam	24 Jam	1 Jam	24 Jam	1 Jam	24 Jam
Cibeureum	10,3	6,0	48,5	28,34	65,2	38,0
Cimahi	23,0	13,4	85,5	49,8	105,0	61,2
Padalarang	21,4	12,5	30,6	17,8	47,3	27,6
Bandung Wetan	28,0	16,3	71,6	41,7	87,2	50,8
Buahbatu	91,5	53,3	159,5	92,9	170,1	99,1

Nilai ISPU dihitung dan intepretasikan sesuai kategori ISPU (Septian Anwar dkk., 2019). Penilaian ISPU untuk parameter PM_{2.5}, PM₁₀ dan TSP dihitung dengan pendekatan rumus sebagai berikut :

$$I = \frac{I_a - I_b}{X_a - X_b} (X_x - X_b) + I_b \dots \dots \dots (7)$$

Dimana : I = ISPU terhitung; X_a = kadar ambien batas atas (µg/Nm³); X_b = kadar ambien batas bawah (µg/Nm³); I_a = ISPU batas atas; I_b = ISPU batas bawah; X_x = kadar ambien hasil pengukuran (µg/Nm³). Level pencemaran udara dibagi menjadi lima (5) yaitu : 1) 0-50 adalah baik; 2) 51-100 adalah sedang; 3) 101-199 adalah tidak sehat; 4) 200-299 adalah sangat tidak sehat dan 5) adalah 300-500 adalah berbahaya (Damara dkk., 2017; Kurniawan, 2018). Hasil identifikasi ISPU tersedia pada Tabel 5.

Tabel 5 . Tingkat Pencemaran Udara di Kawasan Industri

	PM2.5 (µg/m ³)		PM10 (µg/m ³)		TSP (µg/m ³)	
	24 Jam	Indeks ISPU	24 Jam	Indeks ISPU	24 Jam	Indeks ISPU
Cibeureum	6,0	19 (Baik)	28,34	28 (Baik)	38,0	16 (Baik)
Cimahi	13,4	43 (Baik)	49,8	50 (Baik)	61,2	26 (Baik)
Padalarang	12,5	40 (Baik)	17,8	18 (Baik)	27,6	12 (Baik)
Bandung Wetan	16,3	63 (Sedang)	41,7	42 (Baik)	50,8	21 (Baik)
Buahbatu	53,3	110 (Tidak Sehat)	92,9	47 (Baik)	99,1	41 (Baik)

Hasil perhitungan indeks ISPU diketahui bahwa untuk PM₁₀ dan TSP masih masuk kategori baik, namun untuk parameter PM_{2.5} di lokasi 4 dan 5 masuk ke dalam kategori sedang dan tidak sehat. PM_{2.5} lebih berbahaya dikarenakan ukurannya yang sangat kecil, bisa langsung mencapai paru-paru disebut juga partikulat terespirasi (Fang dkk., 2002). Rata-rata kelembaban udara pada saat sampling di kawasan industri buahbatu adalah 59 % dan cuaca cerah dengan suhu 29,9 °C. Kelembaban udara yang rendah dan suhu yang tinggi menjadi salah satu faktor partikulat terespirasi menjadi tinggi di suatu daerah (Chau dkk., 2021). Unsur-unsur kimia yang berada pada partikulat terespirasi dibagi menjadi unsur kimia anorganik termasuk unsur kimia logam berat dan juga unsur kimia organik seperti *black carbon* (BC). Oleh karena itu penting untuk mengestimasi konsentrasi polutan yang dapat terhirup oleh pekerja dan masyarakat di Kawasan Industri Kota Bandung, Kab. Bandung Barat dan Cimahi. Hasil penilaian konsentrasi polutan yang terhirup atau IEC tersedia pada Tabel 6.

Paparan BC, TSP dan NO₂ walaupun dalam konsentrasi rendah mampu bertahan lama didalam paru-paru dan berdampak pada penyakit *microvasculature* (Witters dkk., 2021) kontributor kedua terbesar dalam pemanasan global setelah karbondioksida (Samad dkk., 2020). Hasil pemeriksaan konsentrasi BC di Cibeureum, Cimahi, Padalarang, Bandung Wetan dan Buahbatu secara berturut-turut adalah adalah 0,94 µg/m³, 0,90 µg/m³, 1,27 µg/m³, 1,65 µg/m³, dan 1,08 µg/m³. Jika dibandingkan dengan area penelitian yang dilakukan oleh (C. Huang dkk., 2022; M. C. Huang & Lin, 2008) maka kadar BC yang terukur di Kota Bandung, Kab. Bandung Barat dan Cimahi lebih tinggi kadarnya.

Tabel 6 . Inhalation Exposure Concentration (µg/m³)

	Cibeureum	Cimahi	Padalarang	Bandung Wetan	Buahbatu
TSP	14,18	22,83	10,29	18,96	36,99
PM ₁₀	10,55	18,59	6,65	15,57	34,69
PM _{2.5}	2,24	5,00	4,65	6,09	19,83
BC	0,21	0,20	0,28	0,36	0,23

Berdasarkan Tabel 6 diketahui bahwa IEC TSP berkisar 10,29-36,99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; IEC PM_{10} berkisar 6,65-34,69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; IEC $\text{PM}_{2,5}$ antara 2,24-19,83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan BC ada di rentang 0,20-0,36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Konsentrasi IEC TSP, PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ tertinggi ada di daerah buahbatu dengan nilai secara berturut-turut adalah 36,99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 34,69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 19,83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sedangkan BC tertinggi ada di daerah Bandung Wetan dengan 0,36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Berdasarkan perhitungan korelasi Pearson menunjukkan bahwa ada korelasi yang signifikan antara TSP dengan PM_{10} dengan koefisien korelasi ($r = 0,999$) dan $\text{PM}_{2,5}$ ($r = 0,909$) semakin tinggi TSP maka semakin tinggi juga PM_{10} dan $\text{PM}_{2,5}$ yang terhirup oleh pekerja di kawasan industri. Namun untuk BC terhadap TSP nilai korelasinya adalah $r = -0,249$ ada kecenderungan semakin tinggi TSP justru kadar BC yang terhirup semakin rendah pada studi ini. Hal ini dapat terjadi dikarenakan kondisi lingkungan dan aktivitas manusia disekitarnya yang berbeda ketika sampling (Basha dkk., 2010). Analisis BC mulai banyak dilakukan diberbagai peneliti di dunia, dikarenakan BC bersifat karsinogenik dan membahayakan kesehatan manusia terutama anak-anak dan orang lanjut usia sebagai kelompok rentang (Davy dkk., 2017; Santoso dkk., 2020; Zhang dkk., 2020). BC bersumber dari pembakaran tidak sempurna bahan bakar fosil, biomassa dan *biofuel* (Zhang dkk., 2020). Di lokasi kawasan industri Bandung Wetan konsentrasi TSP lebih rendah di dibandingkan dengan kawasan industri di buahbatu, namun kandungan BC lebih tinggi hal ini dapat disebabkan lokasi industri Bandung Wetan terdapat di tengah kota dengan jalur transportasi yang padat kendaraan, dibandingkan kawasan industri Buahbatu yang lebih terisolir dari jalur transportasi publik sehingga menyebabkan kandungan BC yang lebih rendah. Faktor lain yang lebih mempengaruhi kadar BC di udara adalah korelasi yang kuat terhadap kadar *Polycyclic Aromatic Hydrocarbon* (PAHs) di udara (Huang dkk., 2022). Maka dapat disarankan dilakukan analisis atau kajian pengaruh BC dengan kehadiran PAHs di udara.

3. KESIMPULAN

TSP, PM_{10} dan $\text{PM}_{2,5}$ merupakan partikulat yang dapat terhirup atau terinhalasi yang mampu langsung masuk ke dalam paru-paru manusia melalui jalur penafasan. Komposisi partikulat terespirasi dapat mengandung unsur kimia seperti BC yang bersifat karsinogenik. Studi ini membuktikan bahwa di Kawasan Industri Kota Bandung, Kab. Bandung Barat dan Cimahi mengandung BC dengan rentang 0,90-1,65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Sedangkan tingkat pencemaran udara untuk $\text{PM}_{2,5}$ di kawasan industri daerah Bandung Wetan berada dikategori "Sedang" dan daerah Buahbatu menunjukkan kategori "Tidak Sehat". Sehingga perlu dilakukan pemantauan kesehatan yang lebih intensif bagi pekerja di dua daerah kawasan industri tersebut. Hasil perhitungan IEC diketahui bahwa bagi pekerja *outdoor* dan masyarakat di kawasan industri daerah Kota Bandung, Kab. Bandung Barat dan Cimahi terpapar TSP berkisar 10,29-36,99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; IEC PM_{10} berkisar 6,65-34,69 $\mu\text{g}/\text{m}^3$; IEC $\text{PM}_{2,5}$ antara 2,24-19,83 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ dan BC ada di rentang 0,20-0,36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. $\text{PM}_{2,5}$ dan PM_{10} berkorelasi positif dengan TSP dengan nilai korelasi berturut-turut $r = 0,999$ dan $r = 0,909$. Disarankan untuk studi lanjut terhadap unsur logam berat yang terkandung di TSP hingga analisis risiko terhadap kesehatan pekerja dan masyarakat di Kawasan Industri Kota Bandung, Kab. Bandung Barat dan Cimahi dapat dianalisis. Serta bagaimana pengaruh PAHs terhadap kandungan BC di udara juga menarik untuk dikaji lebih dalam lagi.

PERSANTUNAN

Kami berterima kasih kepada Kepala Pusat Sains dan Teknologi Nuklir Terapan (PSTNT) bidang Sains dan Aplikasi Teknologi Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional yang telah memberikan sarana, prasarana dan ijin penelitian serta bimbingan di lapangan sehingga

penelitian ini dapat terlaksana dengan baik dan lancar. Serta pihak PDAM Tirtawening Bandung atas izin penelitian yang telah diberikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alfiah, T., & Yuliawati, E. (2018). Analisis Resiko Kesehatan Lingkungan Udara Ambien Terhadap Pengguna Jalan Dan Masyarakat Sekitar Pada Ruas Jalan Ir. Sukarno Surabaya. *Infomatek*. Vol.20(1), 27. <https://doi.org/10.23969/infomatek.v20i1.878>
- Ali, K., Budhavant, K. B., Safai, P. D., & Rao, P. S. P. (2012). Seasonal factors influencing in chemical composition of total suspended particles at pune, India. *Science of the Total Environment*. Vol.414, 257–267. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.09.011>
- Arditsoglou, A., & Samara, C. (2005). Levels of total suspended particulate matter and major trace elements in Kosovo: A source identification and apportionment study. *Chemosphere*. Vol.59(5), 669–678. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2004.10.056>
- Atmodjo, D. P. D., Kusmartini, I., & Kurniawati, S. (2015). Pengujian unjuk kerja smoke stain reflectometer eel43m dan m43d dalam pengukuran black carbon sampel lingkungan. Seminar Nasional Sains Dan Teknologi Nuklir, 347–348.
- Basha, S., Jhala, J., Thorat, R., Goel, S., Trivedi, R., Shah, K., Menon, G., Gaur, P., Mody, K. H., & Jha, B. (2010). Assessment of heavy metal content in suspended particulate matter of coastal industrial town, Mithapur, Gujarat, India. *Atmospheric Research*. Vol.97(1–2), 257–265. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.04.012>
- Bista, S., Dureau, C., & Chaix, B. (2022). Personal exposure to concentrations and inhalation of black carbon according to transport mode use: The MobiliSense sensor-based study. *Environment International*, 158. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106990>
- Budiarto, A. (2014). Modifikasi Peralatan Sampling Hvas Portabel Unmodifikasi Peralatan Sampling Hvas Portabel Untuk Analisis Total Partikulat Di Udara Ambientuk Analisis Total Partikulat Di Udara Ambien. *Jurnal Riset Teknologi Pencegahan Pencemaran Industri*. Vol.5(1), 15–20. <https://doi.org/10.21771/jrtppi.2014.v5.no1.p15-20>
- Chau, B., Witten, M. L., Cromey, D., Chen, Y., & Lantz, R. C. (2021). Lung developmental is altered after inhalation exposure to various concentrations of calcium arsenate. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 432 (October), 115754. <https://doi.org/10.1016/j.taap.2021.115754>
- Damara, D. Y., Wardhana, I. W., & Sutrisno, E. (2017). Analisis Dampak Kualitas Udara Karbon Monoksida Akibat Kegiatan Car Rree Day Menggunakan Program Caline4 dan Surfer. *Jurnal Teknik Lingkungan*. Vol.6(1), 1–14.
- Davy, P. M., Tremper, A. H., Nicolosi, E. M. G., Quincey, P., & Fuller, G. W. (2017).

- Estimating particulate black carbon concentrations using two offline light absorption methods applied to four types of filter media. *Atmospheric Environment*. Vol.152, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.12.010>
- Duppa, A., Daud, A., & Bahar, B. (2020). Kualitas Udara Ambien Di Sekitar Industri Semen Bosowa Kabupaten Maros. *Jurnal Kesehatan Masyarakat Maritim*. Vol.3(1), 86–92. <https://doi.org/10.30597/jkmm.v3i1.10296>
- Fitria, N., Damanhuri, E., & Salami, I. R. S. (2020). Evaluation of hospital infectious waste management (HIWM) implementation based on applicable regulations in Bandung. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 483 (1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/483/1/012026>
- Huang, C., Meng, L., He, Y., Shang, N., Yu, H., Huang, T., Zhu, A. xing, Yang, H., Zhao, K., & Yao, L. (2022). Spatial variation of particulate black carbon, and its sources in a large eutrophic urban lake in China. *Science of the Total Environment*. 803, 150057. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150057>
- Huang, M. C., & Lin, J. J. (2008). Characteristics and management of infectious industrial waste in Taiwan. *Waste Management* Vol.28(11), 2220–2228. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.09.038>
- Kang, C. H., Kim, W. H., Ko, H. J., & Hong, S. B. (2009). Asian Dust effects on Total Suspended Particulate (TSP) compositions at Gosan in Jeju Island, Korea. *Atmospheric Research*. Vol.94(2), 345–355. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.06.013>
- Kurniawan, A. (2018). Pengukuran Parameter Kualitas Udara (Co, No2, So2, O3 Dan Pm10) Di Bukit Kototabang Berbasis Ispu. *Jurnal Teknosains*. Vol.7 (1), 1. <https://doi.org/10.22146/teknosains.34658>
- Liu, J., & Han, G. (2021). Tracing Riverine Particulate Black Carbon Sources in Xijiang River Basin: Insight from Stable Isotopic Composition and Bayesian Mixing Model. *Water Research*. 194, 116932. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116932>
- Manojkumar, N., & Srimuruganandam, B. (2021). Investigation of on-road fine particulate matter exposure concentration and its inhalation dosage levels in an urban area. *Building and Environment*. 198(February), 107914. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107914>
- Rahman, A. A., Dwi, A., & Rusman, P. (2021). Gambaran Kualitas Udara Ambien Dan Keluhan Gangguan Pernapasan Pada Masyarakat Kota Pare Pare. *Jurnal Umpar*. Vol.4(3). <http://jurnal.umpar.ac.id/index.php/makes/article/view/620/769>
- Rita, Lestiani, D. D., Hamonangan, E., Santoso, M., & Yulinawati, H. (2016). Air Quality (PM10 dan PM2.5) For Completing the Enviromental Quality Index. *Ecolab*. Vol.10 (1), 1–7. <https://media.neliti.com/media/publications/280278-kualitas-udara-pm10-dan-pm25-untuk-melen-961eb676.pdf>

- Samad, A., Vogt, U., Panta, A., & Uprety, D. (2020). Vertical distribution of particulate matter, black carbon and ultra-fine particles in Stuttgart, Germany. *Atmospheric Pollution Research*. Vol.11(8), 1441–1450. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.05.017>
- Santoso, M., Lestiani, D. D., Damastuti, E., Kurniawati, S., Kusmartini, I., Dwi Atmodjo, D. P., Sari, D. K., Muhtarom, T., Permadi, D. A., & Hopke, P. K. (2020). Long term characteristics of atmospheric particulate matter and compositions in Jakarta, Indonesia. *Atmospheric Pollution Research*. Vol.11(12), 2215–2225. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2020.09.006>
- Septian Anwar, F., Mallongi, A., Alimin Maidin, M., Studi Ilmu Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin, (2019). Kualitas Udara Ambien Co Dan Tsp Di Permukiman Sekitar Kawasan Industri Pt. Semen Tonasa Ambient Air Quality of Co and Tsp in Settlements Around Pt. Semen Tonasa. 84 Jkmm, 2(1).
- US EPA. (2009). Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part F, Supplemental Guidance for Inhalation Risk Assessment). Office of Superfund Remediation and Technology Innovation Environmental Protection Agency, I(January), 1–68. http://www.epa.gov/sites/production/files/2015-09/documents/partf_200901_final.pdf
- Wang, T., Rovira, J., Sierra, J., Chen, S. J., Mai, B. X., Schuhmacher, M., & Domingo, J. L. (2019). Characterization and risk assessment of total suspended particles (TSP) and fine particles (PM_{2.5}) in a rural transformational e-waste recycling region of Southern China. *Science of the Total Environment*. 692, 432–440. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.271>
- Witters, K., Dockx, Y., Op't Roodt, J., Lefebvre, W., Vanpoucke, C., Plusquin, M., Vangronsveld, J., Janssen, B. G., & Nawrot, T. S. (2021). Dynamics of skin microvascular blood flow in 4–6-year-old children in association with pre- and postnatal black carbon and particulate air pollution exposure. *Environment International*. 157 (July), 106799. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106799>
- Wulansari, A., Sarto, S., & Saleh, Y. D. (2016). Kualitas udara ambien dan fungsi paru pada siswa sekolah dasar di Yogyakarta. *Berita Kedokteran Masyarakat*. Vol.32 (3), 83. <https://doi.org/10.22146/bkm.7589>
- Zhang, Y., Zhang, X., Fan, X., Ni, C., Sun, Z., Wang, S., Fan, J., & Zheng, C. (2020). Modifying effects of temperature on human mortality related to black carbon particulates in Beijing, China. *Atmospheric Environment*. Vol.243 (24), 117845. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117845>