



**FORUM GURU BESAR**  
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



# **Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung**



## **Peran Penilaian Risiko Kesehatan Lingkungan dalam Mendukung Pembangunan Berkelanjutan**

**Profesor Indah Rachmatiah Siti Salami**

Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan  
Institut Teknologi Bandung

Aula Barat ITB  
6 Desember 2025



Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

**PERAN PENILAIAN RISIKO KESEHATAN  
LINGKUNGAN DALAM MENDUKUNG  
PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN**



Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

# **PERAN PENILAIAN RISIKO KESEHATAN LINGKUNGAN DALAM MENDUKUNG PEMBANGUNAN BERKELANJUTAN**

**Prof. Indah Rachmatiah Siti Salami**

6 Desember 2025  
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

*Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:*

***Peran Penilaian Risiko Kesehatan Lingkungan dalam Mendukung Pembangunan Berkelanjutan***

Penulis : Prof. Indah Rachmatiah Siti Salami

Reviewer : Prof. Herto Dwi Ariesyady

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2025

ISBN : 978-623-297-840-9

e-ISBN : 978-623-297-841-6(PDF)



📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,  
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132  
☎ +62 22 20469057  
🌐 www.itbpress.id  
✉ office@itbpress.id  
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92  
APPTI No. 005.062.1.10.2018

Teruntuk Keluarga Tersayang, Taufiq, Thariq, Zaidan, dan Vindy.

Semoga selalu menjadi sumber kebaikan, keberkahan, dan kebahagiaan dunia dan akhirat, memberi manfaat  
sebesar-mungkin bagi kemanusiaan.



# PRAKATA

*Bismillahirrohmaanirrohiim,*

Puji syukur kehadirat Allah Swt. atas rahmat dan karunia-Nya, sehingga buku orasi ilmiah berjudul *Peran Penilaian Risiko Kesehatan Lingkungan dalam Mendukung Pembangunan Berkelanjutan* ini dapat hadir di hadapan para pembaca dan sivitas akademika. Karya ini merupakan sebuah proses perjalanan pemikiran dan dedikasi panjang dalam mengabdikan diri pada bidang kesehatan dan keamanan lingkungan, khususnya sebagai bagian integral dari proses pengukuhan jabatan akademik Guru Besar di Institut Teknologi Bandung.

Buku ini disusun dengan tujuan utama untuk membagikan pemikiran, hasil penelitian, serta refleksi terhadap isu-isu krusial di bidang penilaian risiko kesehatan lingkungan dan kaitannya dengan upaya mewujudkan pembangunan berkelanjutan. Berangkat dari keprihatinan akan dampak aktivitas antropogenik terhadap kualitas lingkungan dan kesehatan masyarakat, khususnya di Indonesia, buku ini mencoba menghadirkan perspektif yang cukup komprehensif. Di dalamnya, pembaca akan menemukan uraian mengenai kompleksitas xenobiotik di lingkungan kita, dinamika perilakunya, hingga metode evaluasi risiko yang sistematis dan berbasis bukti.

Penulisan buku orasi ilmiah ini juga menjadi sarana untuk mendokumentasikan sebagian dari kontribusi yang telah dilakukan, baik melalui penelitian dasar maupun terapan, mandiri maupun kerja sama. Studi-studi kasus yang disertakan, seperti hasil penelitian di DAS Citarum dan Kabupaten Bandung yang mengungkap kontaminasi logam berat dan polutan lainnya, diharapkan dapat memberikan gambaran nyata akan relevansi keilmuan ini dalam konteks Indonesia.

Ucapan terima kasih yang tulus saya haturkan kepada berbagai pihak yang telah mendukung perjalanan akademik ini. Kepada Institut Teknologi Bandung, atas kesempatan berharga yang diberikan untuk terus berkarya dan mengembangkan ilmu. Kepada seluruh kolega, kolaborator penelitian (Dinas Lingkungan Hidup Provinsi Jawa Barat, Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten

Bandung, dan pihak-pihak lainnya) yang telah berbagi ide dan sinergi. Tidak lupa, kepada para mahasiswa bimbingan yang tak kenal lelah membantu dalam riset, serta kepada keluarga tercinta atas dukungan, pengertian, dan inspirasi yang tak henti. Khususnya pula kepada Ibu Prof. Em. Juli Soemirat yang selalu memberi bimbingan, arahan, dan sebagai contoh teladan untuk terus berkarya dan memberi manfaat.

Semoga buku orasi ilmiah ini tidak hanya menjadi penanda sebuah pencapaian personal, tetapi juga dapat berkontribusi dalam memperkaya khazanah ilmu pengetahuan, memicu diskusi lebih lanjut, serta menginspirasi langkah-langkah konkret dalam menjaga keseimbangan antara pembangunan dan kelestarian lingkungan demi terwujudnya masa depan yang sehat dan berkelanjutan bagi kita semua.

Bandung, 6 Desember 2025

Penulis

Prof. Ir. Indah Rachmatiah Siti Salami, M.Sc., Ph.D.

# SINOPSIS

Penyajian pada buku ini secara komprehensif menguraikan peran krusial penilaian risiko kesehatan lingkungan (*Environmental Health Risk Assessment/EHRA*) sebagai fondasi dalam mewujudkan lingkungan yang aman untuk mencapai pembangunan berkelanjutan, selaras dengan Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDG) No. 3 mengenai Kehidupan Sehat dan Sejahtera. Laporan WHO menekankan bahwa hampir seperempat kematian secara global berkaitan dengan faktor lingkungan, dan menyoroti urgensi pemahaman interaksi kompleks antara agen penyebab penyakit, manusia (sebagai *host*), dan lingkungan. Kasus-kasus pencemaran seperti insiden Woburn digarisbawahi sebagai pengingat akan tantangan dalam mengaitkan pencemaran lingkungan dengan dampak kesehatan.

Pembahasan yang menyeluruh mengenai metodologi penilaian risiko, yang meliputi identifikasi bahaya, evaluasi pajanan, analisis dosis-respons, dan karakterisasi risiko. Hasil penilaian risiko menjadi dasar dalam evaluasi penentuan manajemen risiko, dan menjadi informasi yang penting untuk pengambil Keputusan atau kebijakan dan mitigasi risiko. Dibahas mengenai berbagai jenis xenobiotic dari penelitian yang sudah dilakukan, mulai dari pestisida, farmasetika, logam berat, hingga *emerging pollutants* seperti mikroplastik dan fitalat. Xenobiotik ini diidentifikasi sebagai bahaya yang berasal dari aktivitas manusia di sektor industri, pertanian, maupun domestik. Buku ini juga menyajikan berbagai temuan penelitian di Indonesia, khususnya di wilayah Citarum Hulu dan Bandung, yang menunjukkan keberadaan dan distribusi xenobiotik ini di air, tanah, udara, dan biota, beserta penilaian risiko yang diperoleh dari berbagai kondisi di lapangan.

Penelitian-penelitian tersebut secara spesifik mengilustrasikan perjalanan dan nasib xenobiotik di lingkungan, termasuk potensi pergerakan dan bioakumulasinya. Hal ini menentukan bagaimana dan di mana organisme serta manusia dapat terpajan melalui rute oral, dermal, dan inhalasi dari sumber pencemar di lingkungan. Pengukuran pajanan sering kali menggunakan data pajanan *default* atau baku untuk kemudahan, namun dengan melakukan pengumpulan data pajanan yang riil pada populasi studi

atau penggunaan pendekatan statistik probabilistik dapat mengurangi ketidakpastian.

Lebih lanjut, buku ini menjelaskan kualitas dan kuantitas dampak serta efek xenobiotik terhadap kesehatan manusia dan ekosistem. Efek dapat diukur melalui biomarker pajanan dan respons/efek, serta dinilai menggunakan DALYs (*Disability Adjusted Life Year*) untuk mengukur beban penyakit dan kerugian akibat pajanan, seperti yang dicontohkan pada kasus arsenik di Kabupaten Bandung. Efek ekotoksikologi pada organisme nonmanusia juga diungkap melalui studi pada limbah industri tekstil, dan pajanan radioaktif.

Hasil penelitian penilaian risiko kesehatan, baik karsinogenik maupun nonkarsinogenik, dilakukan untuk pajanan dari air (logam berat) dan udara (polutan dan logam berat, PM<sub>2.5</sub>), dengan menggunakan analisis probabilistik untuk mendapatkan gambaran distribusi risiko yang lebih akurat pada populasi. Hasil penelitian di area Citarum Hulu dan Bandung menyoroti kemampuan dalam menentukan prioritas risiko dari berbagai polutan, juga menguraikan adanya potensi risiko gangguan fungsi paru-paru pada anak-anak di daerah industri.

Bagian akhir membahas tantangan dalam pengelolaan lingkungan berkelanjutan, khususnya dalam mengidentifikasi *emerging pollutants*, mendeteksi efek dini pada organisme, dan mengintegrasikan penilaian risiko secara holistik dengan faktor-faktor sosial-ekonomi, untuk membantu penentuan prioritas atau kebijakan pengelolaan lingkungan. Dari diskusi yang dibahas, penekanan perlunya kolaborasi multidisiplin antara ilmu kimia, biokimia, matematika, data analitik, instrumentasi, serta spasial dan temporal untuk mengatasi tantangan ini di masa depan.

# DAFTAR ISI

|   |      |
|---|------|
| PRAKATA.....  | vii  |
| SINOPSIS .....  | ix   |
| DAFTAR ISI.....   | xi   |
| DAFTAR GAMBAR.....  | xiii |
| DAFTAR TABEL.....   | xv   |
| 1 LATAR BELAKANG .....  | 1    |
| 1.1 Pembangunan Berkelanjutan.....                                      | 1    |
| 1.2 Kesehatan dan Terjadinya Penyakit.....                              | 2    |
| 1.3 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan 3 .....                            | 5    |
| 2 PEMBANGUNAN DAN PERMASALAHAN LINGKUNGAN .....                         | 7    |
| 2.1 Pembangunan dan Implikasinya .....                                  | 7    |
| 2.2 Perilaku dan Nasib Zat atau Limbah di Lingkungan.....               | 8    |
| 3 PENILAIAN DAN ANALISIS RISIKO KESEHATAN LINGKUNGAN ...                | 11   |
| 3.1 Tahapan Penilaian Risiko .....                                      | 11   |
| 3.2 Karakterisasi Risiko.....   | 13   |
| 3.3 Penilaian dan Manajemen Risiko .....                                | 15   |
| 4 SUMBER KEGIATAN DAN JENIS XENOBIOTIK.....                             | 19   |
| 4.1 Sumber Kegiatan Penghasil Bahaya Lingkungan .....                   | 19   |
| 4.2 Hasil Penelitian Terkait Jenis Bahaya di Lingkungan.....            | 21   |
| 5 PERJALANAN DAN NASIB XENOBIOTIK DI LINGKUNGAN.....                    | 25   |
| 5.1 Proses Transportasi dan Transformasi Xenobiotik .....               | 25   |
| 5.2 Hasil Penelitian Mengenai Perjalanan Xenobiotik.....                | 27   |
| 6 PAJANAN XENOBIOTIK TERHADAP ORGANISME DAN MANUSIA. 29                 |      |
| 6.1 Pengukuran Paparan .....  | 29   |
| 6.2 Hasil Penelitian Terkait Evaluasi Paparan .....                     | 30   |
| 7 KUALITAS DAN KUANTITAS DAMPAK/EFEK.....                               | 37   |
| 7.1 Terjadinya Efek Biologis .....                                      | 37   |
| 7.2 Pengukuran Efek dan Biomarker .....                                 | 37   |
| 7.3 Pengukuran Kerugian Akibat Efek atau Penyakit.....                  | 39   |
| 7.4 Pengukuran Efek pada Lingkungan Nonmanusia .....                    | 41   |
| 8 PENILAIAN RISIKO KESEHATAN DAN LINGKUNGAN.....                        | 43   |
| 8.1 Penilaian Risiko Kesehatan dari Paparan Air .....                   | 43   |
| 8.2 Perhitungan Risiko Kesehatan dengan Analisis<br>Probabilistik ..... | 44   |

|      |  |    |
|------|--|----|
| 8.3. | Pengaruh Jarak Sumber Air Tanah dengan Sungai Citarum ...                      | 45 |
| 8.4. | Prioritisasi Pestisida di Lingkungan Citarum Hulu .....                        | 47 |
| 8.5. | Penilaian Risiko Kesehatan dari Paparan Udara .....                            | 48 |
| 8.6. | Dampak Kesehatan pada Masyarakat .....   | 49 |
| 9    | TANTANGAN PENILAIAN RISIKO UNTUK PENGELOLAAN<br>LINGKUNGAN BERKELANJUTAN ..... | 53 |
| 10   | PENUTUP .....  | 55 |
| 11   | UCAPAN TERIMA KASIH .....  | 57 |
|      | DAFTAR PUSTAKA .....   | 59 |
|      | CURRICULUM VITAE .....   | 65 |

# DAFTAR GAMBAR

|                  |   |    |
|------------------|---|----|
| <b>Gambar 1</b>  | SDGs dan hubungannya dengan kesehatan lingkungan (Pruss-Ustun, dkk., 2016) .....  | 2  |
| <b>Gambar 2</b>  | Segitiga keterkaitan agen- <i>host</i> -lingkungan .....  | 4  |
| <b>Gambar 3</b>  | Hubungan teknologi dan kesejahteraan (Soemirat, 2011) .....   | 8  |
| <b>Gambar 4</b>  | Tahapan Analisis Risiko (Soemirat, 2013).....   | 13 |
| <b>Gambar 5</b>  | Paradigma Analisis Risiko .....   | 16 |
| <b>Gambar 6</b>  | Lingkup dan prinsip dalam penilaian risiko kesehatan dan lingkungan.....  | 18 |
| <b>Gambar 7</b>  | Jenis pestisida yang digunakan di pertanian di area Citarum Hulu (Utami, dkk., 2020b).....  | 22 |
| <b>Gambar 8</b>  | Proses perpindahan dan transformasi senyawa kimia di lingkungan (Calamari, 1996) .....  | 26 |
| <b>Gambar 9</b>  | Rute perjalanan kontaminan dari Sungai Citarum ke masyarakat (Utami, dll., 2023).....   | 32 |
| <b>Gambar 10</b> | Penggunaan air penduduk (L/orang/hari) di Area Ciwalengke Kabupaten Bandung (Utami, dkk. 2022).....   | 33 |
| <b>Gambar 11</b> | Perbandingan kandungan logam berat pada ikan nila ( <i>O. niloticus</i> ) dengan ikan mas ( <i>C. carpio</i> ). (Salami, dkk. 2012). .....  | 35 |
| <b>Gambar 12</b> | Distribusi spasial beban penyakit kanker kulit akibat pajanan arsenik melalui penggunaan air menurut kecamatan di Kabupaten Bandung, 2021: (a) DALYs, dan (b) DALYs rate. (Fahimah, 2024).....  | 40 |
| <b>Gambar 13</b> | Perbandingan Nilai Aberasi Kromosom (Rerata $\pm$ SD(%)) Antar Ruangan pada Semua Lokasi Studi (Ket.: Kontrol Negatif (KN); Ruang Operator Fluoroskopi (OFL); Ruang Operator SC-Scan (OCT); Ruang Operator Kardiografi Intervensi (OKI), Ruang Operator Radioterapi (ORT); Ruang Pemeriksaan Fluoroskopi (RFL); Ruang Pemeriksaan Kardiologi Intervensi (PKI), dan Kontrol Positif (KP) ..... | 42 |

|                  |   |    |
|------------------|---|----|
| <b>Gambar 14</b> | Persentase jumlah sampel yang memiliki konsentrasi logam berat melebihi baku mutu air untuk konsumsi di 7 kecamatan .....                                 | 43 |
| <b>Gambar 15</b> | Hasil penilaian rata-rata HI pada jalur ingesti berdasarkan jenis air yang dikonsumsi .....   | 43 |
| <b>Gambar 16</b> | Distribusi nilai HI di Kecamatan Baleendah .....  | 45 |
| <b>Gambar 17</b> | Distribusi nilai HI di Kecamatan Margaasih.....   | 45 |
| <b>Gambar 18</b> | Distribusi Spasial nilai HI untuk Anak-anak (a) Ciparay – Pertanian; (b) Dayeuhkolot – industri; (c) Margaasih – permukiman. ....                         | 47 |
| <b>Gambar 19</b> | Nilai HI dari pajanan logam berat dari PM <sub>2,5</sub> di area pertanian, industri, dan permukiman (Herwiandani, 2024) .....                            | 49 |
| <b>Gambar 20</b> | Nilai HI dari pajanan PM <sub>2,5</sub> , SO <sub>2</sub> , NO <sub>2</sub> , dan Ozon, di area pertanian, industri, dan permukiman (Pratiwi, 2024) ..... | 49 |
| <b>Gambar 21</b> | Hubungan <i>intake</i> pencemar dengan penurunan fungsi paru FEV <sub>1,0</sub> .....   | 50 |
| <b>Gambar 22</b> | Perbandingan nilai kapasitas paru-paru pada anak di daerah industri dan bukan industri (Salami, dkk., 2014) .....   | 51 |

# DAFTAR TABEL

|                |  |    |
|----------------|--|----|
| <b>Tabel 1</b> | Contoh xenobiotik dari sumber aktivitas manusia .....  | 21 |
| <b>Tabel 2</b> | Xenobiotik yang didapatkan dari kegiatan domestik .....  | 21 |
| <b>Tabel 3</b> | Kandungan logam berat Cu dan Pb pada ikan mas di Waduk<br>Cirata (Salami, dkk., 2008).....     | 34 |
| <b>Tabel 4</b> | Nilai risiko kesehatan nonkarsinogenik (HI) dari oral dan<br>dermal di 9 kecamatan.....        | 45 |
| <b>Tabel 5</b> | Nilai Risiko ECR pada dewasa dan anak untuk daerah<br>industri, pertanian, dan permukiman..... | 46 |



# 1 LATAR BELAKANG

## 1.1 Pembangunan Berkelanjutan

Pembangunan berkelanjutan (*sustainable development*), sesuai Laporan Bruntland tahun 1987, didefinisikan sebagai pembangunan yang memenuhi kebutuhan generasi saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka sendiri. Konsep ini pertama kali dipopulerkan dalam laporan *Our Common Future* oleh Komisi Brundtland dan menjadi dasar bagi banyak kebijakan global, termasuk Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) Perserikatan Bangsa-Bangsa yang ditetapkan pada 2015. SDGs (Sustainable Development Goals) yang menjadi arahan bagi setiap negara untuk mencapai 17 goals pada akhir 2030.

Pembangunan berkelanjutan secara konseptual dibangun atas tiga dimensi utama yang saling terkait, yaitu ekonomi, sosial, dan lingkungan. Menurut Pruss-Ustun, dkk. (2016), pusat dari target SDGs adalah SDG No. 3, yaitu Kehidupan Sehat dan Sejahtera (Gambar 1), bertujuan untuk memastikan kehidupan yang sehat dan mendukung kesejahteraan bagi semua orang dari segala usia.

Lebih lanjut, sesuai laporan WHO tersebut, ditunjukkan data bahwa 24% kematian secara global adalah berhubungan dengan lingkungan (dihitung dari beban penyakit global dalam DALYs, *updated data*). Risiko lingkungan yang dapat dimodifikasi untuk mencapai derajat kesehatan. Khususnya, pada anak-anak di bawah lima tahun, potensi terbesar untuk mendapatkan manfaat kesehatan melalui perbaikan lingkungan sebesar 26%. Hal yang sama juga untuk faktor polusi udara, risiko pekerjaan dan risiko fisik jatuh/kecelakaan, dapat memengaruhi kelompok usia 50-70 tahun. Oleh karena itu perbaikan lingkungan dapat menghindari dan menurunkan kematian, dan dapat mencapai kehidupan sehat dan sejahtera, atau dengan kata lain diperlukan lingkungan yang aman untuk mendukung kehidupan manusia dan ekosistem.



Gambar 1 SDGs dan hubungannya dengan kesehatan lingkungan (Pruss-Ustun, dkk., 2016)

## 1.2 Kesehatan dan Terjadinya Penyakit

Untuk mencapai kehidupan sehat, yang didefinisikan menurut WHO sebagai sebagai keadaan sejahtera fisik, mental, dan sosial yang lengkap dan bukan sekadar ketiadaan penyakit atau kelemahan. Sementara di Indonesia, definisi sehat diatur dalam Undang-Undang Nomor 17 Tahun 2023 tentang Kesehatan, yang menyatakan bahwa kesehatan adalah keadaan sejahtera fisik, mental, spiritual, dan sosial yang memungkinkan setiap orang hidup produktif secara sosial dan ekonomis. Sementara sakit atau penyakit didefinisikan sebagai kondisi abnormal pada tubuh manusia yang disebabkan oleh berbagai faktor

dan ditandai dengan keluhan atau gejala tertentu, yang dapat memengaruhi fungsi fisik, mental, atau sosial.

Secara umum, jenis penyakit dikategorikan menjadi dua bagian besar, yaitu sebagai penyakit menular dan tidak menular. Penyakit menular adalah penyakit yang disebabkan oleh infeksi mikroorganisme seperti bakteri, virus, parasit, dan jamur yang dapat menyebar secara langsung atau tidak langsung dari satu orang ke orang lain. Contoh penyakit menular adalah diare, TBC, typhus, demam berdarah, COVID-19, dll. Sedangkan penyakit tidak menular tidak disebabkan oleh infeksi organisme dan tidak dapat ditularkan secara langsung dari satu individu ke individu lainnya. Contoh penyakit tidak menular adalah penyakit kardiovaskular (jantung dan stroke), kanker, diabetes, penyakit pernapasan kronis (asma, PPOK), hipertensi, obesitas, dan penyakit ginjal kronis, dll. Penyebab penyakit tidak menular dapat bermacam-macam, mulai dari (Salami dan Soemirat, 2024) :

- zat kimia (zat organik, inorganik termasuk logam berat),
- kondisi fisika (seperti suhu, radiasi, getaran, energi seperti tabrakan dan kecelakaan)
- kondisi fisik tubuh atau fisiologis (usia tua, kehamilan, pre-eclamsi)
- kondisi psikologis (kejiwaan), dan
- faktor genetik (penyakit mongolism, buta warna, dll.).

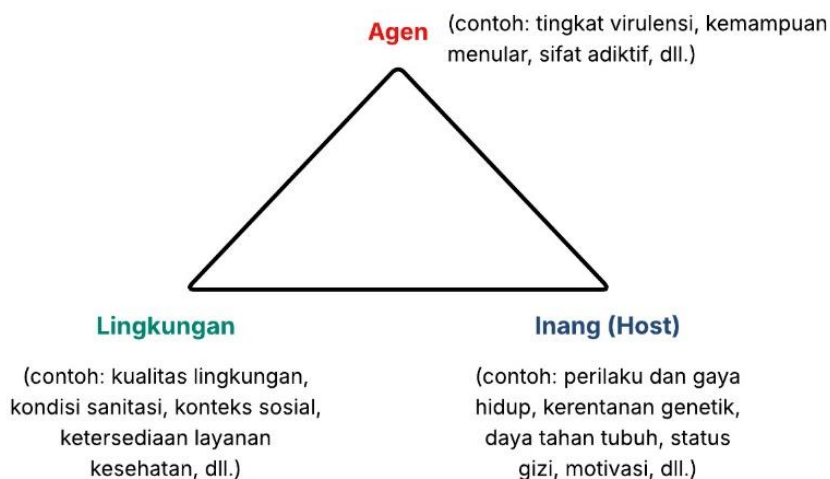
Penyakit tidak menular umumnya berkembang secara perlahan dalam jangka waktu yang panjang (kronis) dan sering kali berkaitan dengan kombinasi faktor genetik, gaya hidup, dan lingkungan. Penyakit tidak menular seperti jantung, stroke, kanker, diabetes, dan penyakit paru-paru kronis, secara kolektif bertanggung jawab atas 74% dari semua kematian di seluruh dunia (Pruss-Ustun dkk., 2016)

Secara definisi sakit atau penyakit dilihat sebagai adanya ketidakseimbangan kondisi tubuh yang memerlukan intervensi pencegahan dan pengobatan, sebagaimana dijelaskan dalam konsep segitiga agen-*host*-lingkungan pada Gambar 2. Kejadian penyakit melibatkan tiga faktor berkaitan, antara lain:

- Agen (penyebab penyakit), bisa merupakan mikroba atau makhluk hidup, dan juga bukan makhluk hidup (bahan kimia, suhu, tekanan, energi, radiasi, dll.);

- *Host* atau pejamu, atau inang, dalam hal ini adalah manusia; dan juga
- Lingkungan (air, udara, tanah, sosiosfir, biosfir).

Kejadian penyakit sering disebut sebagai ‘*web causation*’ yang kompleks dan tidak sederhana. Terdapat determinan faktor yang ada pada masing-masing agen, *host*, dan lingkungan, yang secara bersama-sama kemudian dapat menghasilkan resultan kejadian penyakit. Faktor determinan atau penentu adalah elemen/faktor atau variabel yang secara langsung atau tidak langsung memengaruhi kemunculan, penyebaran, atau terjadinya suatu penyakit pada individu, kelompok, atau populasi, namun faktor penentu ini bukan penyebab penyakit (agen). Contoh-contoh faktor determinan/penentu pada masing-masing agen, *host*, dan lingkungan, dapat dilihat pada Gambar 2. Faktor determinan pada Lingkungan termasuk sosiosfir seperti pendidikan, demografi, struktur politik, ekonomi, selain lingkungan air, udara, geologi, geografi.



**Gambar 2** Segitiga keterkaitan agen-*host*-lingkungan

Pemahaman interaksi ketiga faktor ini juga dapat digunakan untuk usaha preventif terjadinya penyakit baik bagi individu maupun masyarakat. Sebagai contoh, bila dalam suatu daerah angka penyakit tidak menular tinggi, misal penyakit kanker, maka perlu dievaluasi apakah ada kondisi lingkungan dan masyarakat di daerah tersebut yang agak berbeda dengan yang lainnya, sehingga penyebabnya dapat diketahui. Contoh kasus seperti ini adalah Kasus

Woburn, yang dibuat buku *A Civil Action* dan bahkan dibuat filmnya, dan menjadi kasus *landmark* dalam hukum lingkungan, menyoroti tantangan membuktikan hubungan kausal antara pencemaran dan penyakit.

Kasus Woburn dimulai dengan adanya insiden pencemaran air tanah di Woburn, Massachusetts, Amerika Serikat, pada akhir 1970-an hingga 1980-an, yang dikaitkan dengan kluster kasus leukemia pada anak-anak. Pada 1979, dua sumur air minum kota (Wells G dan H) yang memasok 30% kebutuhan air bagi sekitar 35.000 penduduk ditemukan terkontaminasi zat kimia berbahaya seperti trichloroethylene (TCE), perchloroethylene (PCE), dan senyawa organik klorin lainnya. Kontaminasi ini berasal dari limbah industri yang dibuang oleh tiga perusahaan lokal: W.R. Grace & Co. (pabrik Cryovac), UniFirst Corporation (layanan laundry), dan Beatrice Foods (pabrik penyamakan kulit). Limbah tersebut merembes ke Aberjona River dan tanah sekitar, menyebabkan peningkatan signifikan kasus leukemia akut limfositik pada 28 anak antara 1964-1986, dengan tingkat hingga 8 kali lebih tinggi dari rata-rata nasional (dirangkum dari berbagai sumber).

### 1.3 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan 3

Tujuan SDG Nomor 3, yaitu Kehidupan Sehat dan Sejahtera, bertujuan untuk memastikan kehidupan yang sehat dan mendukung kesejahteraan bagi semua orang dari segala usia, dan menjadi hal yang krusial dalam pemenuhan hak asasi manusia fundamental yang memungkinkan setiap individu mencapai potensi penuhnya. Sesuai dengan Tujuan SDGs No. 3 ini, terdapat beberapa indikator yang terkait dengan lingkungan, sesuai indikator yang ditetapkan di Bappenas, di antaranya adalah:

- Penurunan penyakit menular yang berhubungan dengan air dan lingkungan (malaria, hepatitis, TBC, filariasis),
- Penurunan penyakit tidak menular seperti kardiovaskular, kanker, diabetes, penyakit pernafasan kronis,
- Penurunan angka kematian akibat polusi rumah tangga dan polusi udara luar rumah (ambien),
- Penurunan angka kemarian akibat air tidak aman, sanitasi tidak aman, tidak higienis,
- Penurunan angka kematian akibat keracunan, dan
- Kesiapsiagaan darurat kesehatan.

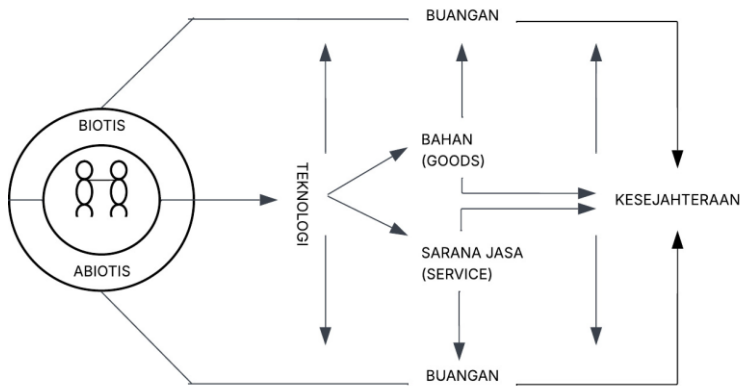
Dengan memperhatikan indikator yang ditetapkan dalam pencapaian SDGs ini, maka mengurangi angka kematian dan penyakit akibat polusi dan kontaminasi bahan kimia berbahaya yang dapat ditemukan di udara, air, dan tanah menjadi substantial dapat dicapai pada tahun 2030. Hal ini sangat relevan dengan lingkup yang dicakup dalam keilmuan teknik lingkungan.

## 2 PEMBANGUNAN DAN PERMASALAHAN LINGKUNGAN

### 2.1 Pembangunan dan Implikasinya

Perkembangan populasi dan kebutuhan manusia untuk meningkatkan kesejahteraan menstimulasi peningkatan kegiatan industri dan aktivitas manusia. Kegiatan manusia untuk pemenuhan kebutuhan dan kesejahteraan dinyatakan dengan adanya produksi dan pembuatan barang serta jasa melalui inovasi teknologi yang sekaligus berkaitan dan memberikan dampak positif untuk tujuan perekonomian negara, kesejahteraan sosial, termasuk dalam pembangunan infrastruktur publik dan fasilitas kesehatan.

Dalam aktivitas manusia di berbagai bidang yang ditujukan untuk mencapai pemenuhan kebutuhan tersebut, produk-produk dan jasa baru yang diciptakan akan memerlukan bahan dan material baru yang dikembangkan dan dibuat dengan memanfaatkan sumber daya alam termasuk ekosistem. Proses produksi dan manufaktur barang atau produk tidak 100% efisien, sehingga sebagian dari proses menghasilkan produk/barang dengan bahan baru tersebut akan kembali masuk ke lingkungan sebagai limbah. Oleh karenanya, limbah dari kegiatan manusia semakin beragam dalam jenis dan jumlahnya, sesuai perkembangan teknologi dan budaya hidup manusia. Karakteristik limbah menjadi lebih bervariasi, baik dari segi komponen kimia, toksisitas, maupun dari sifat penguraiannya di lingkungan. Saat ini banyak yang dinyatakan sebagai '*emerging pollutants*', yaitu bahan atau limbah baru yang pada lalu tidak ada. Lingkungan dan ekosistem sebagai sumber daya, dan penerima limbah, mendapat konsekuensi dari penambahan kegiatan ini, maka dapat mengalami perubahan kualitas lingkungan. Sebagian bahan dan limbah baru tidak dapat diuraikan di alam sehingga pada akhirnya alam mengalami gangguan bahkan kerusakan, dan tidak dapat mendukung kehidupan dan daya tampung lingkungan semakin berkurang. Pada akhirnya, kemudian secara langsung atau tidak langsung dapat memengaruhi kesehatan lingkungan dan kesejahteraan manusia (Gambar 3). Oleh karena itu dunia memahami, bahwa Pembangunan yang dilakukan perlu memerhatikan daya dukung lingkungan sehingga dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan sampai akhir zaman.



**Gambar 3** Hubungan teknologi dan kesejahteraan (Soemirat, 2011)

## 2.2 Perilaku dan Nasib Zat atau Limbah di Lingkungan

Bahan dan materi baru atau limbah dapat memasuki ke lingkungan melalui berbagai cara, seperti emisi, limpasan, kebocoran, penguapan, atau proses-proses lainnya. Keberadaan bahan atau materi dan limbah yang diemisikan ke lingkungan akan mengalami interaksi dan reaksi dengan alam. Baik reaksi dengan unsur abiotik seperti reaksi kimia atau fisika, maupun interaksi dengan makhluk hidup (biotik). Alam atau lingkungan sendiri dapat melakukan pembersihan sendiri apabila zat/bahan atau limbah yang masuk dapat diuraikan melalui proses alami. Siklus hidrologi merupakan contoh bagaimana alam membersihkan dirinya atau *'self-purification'*. Begitu pula proses pengenceran yang terjadi ketika suatu bahan atau limbah masuk ke sungai atau laut. Namun pada kondisi tertentu, di mana zat yang masuk ke lingkungan ini terlalu banyak jumlahnya, atau terdiri atas komponen yang tidak mudah terurai, dan tidak dapat dibersihkan secara alami, maka dikenal dengan kondisi lingkungan mengalami pencemaran.

Proses interaksi bahan atau zat di lingkungan disebut sebagai *"fate and transport"* atau perjalanan zat di alam, di mana zat-zat tersebut dapat berpindah, berubah, dan berpartisipasi di dalam dan antarkompartemen di lingkungan. Secara sederhana, ini seperti zat-zat tersebut "berperpetualang" di alam: mulai dari masuk, menyebar, bertahan, hingga kemudian dapat berkontak dengan makhluk hidup. Masalah akan muncul, jika tidak dikelola dengan baik, zat ini bisa menjadi polutan yang mencemari, dan kemudian mengubah kualitas udara, air, tanah, yang merupakan tempat hidup dan berinteraksi bagi manusia serta makhluk hidup lainnya.

Perilaku dan nasib perjalanan bahan dan materi di alam sendiri dapat sangat bervariasi, tergantung banyak faktor baik dari karakteristik bahan/materi tersebut, jumlahnya, maupun juga dengan kompartemen lingkungan di mana dia berada. Apabila kemudian dia dapat memajani organisme dan dapat memasuki tubuh organisme termasuk manusia, maka bahan materi baru dan limbah ini menjadi materi xenobiotik atau zat asing bagi manusia atau organisme. Menjadi zat asing, karena merupakan zat yang tidak dibutuhkan oleh organisme ataupun manusia, sehingga dapat memberikan efek negatif untuk kesehatan organisme. Oleh karena itu, kehadiran xenobiotik di lingkungan dapat mengubah kualitas lingkungan, yang kemudian memberi dampak bagi organisme lainnya atau ekosistem.



## 3 PENILAIAN DAN ANALISIS RISIKO KESEHATAN LINGKUNGAN

### 3.1 Tahapan Penilaian Risiko

Pengukuran dampak xenobiotik terhadap lingkungan dan manusia menjadi hal yang penting, karena manusia tidak ingin mendapat efek buruk dari xenobiotik yang kita buat sendiri. Begitu pula dengan lingkungan dan ekosistem perlu terjaga agar secara terus-menerus dapat menjadi ekosistem sebagai pendukung bagi kehidupan semua makhluk di bumi ini.

Pengukuran besaran dampak bagi manusia dan lingkungan adalah suatu bentuk asesmen atau penilaian risiko baik bagi manusia yang dinyatakan dengan tingkat gangguan kesehatan, secara individu maupun masyarakat, dan juga memberi dampak lingkungan bagi makhluk hidup selain manusia. Dengan pengetahuan akan kuantitas dan kualitas dampak dan risiko ini, maka kemudian dapat dicari upaya-upaya untuk mengendalikan dan mengelola lingkungan yang lebih jelas, terarah, dan lebih lanjut dapat mendukung keberlanjutan ekosistem dan kehidupan manusia yang lebih sejahtera.

Penilaian risiko kesehatan lingkungan (*Environmental Health Risk Assessment/EHRA*) adalah proses sistematis untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mengestimasi potensi dampak negatif zat kimia, fisik, atau biologis di lingkungan terhadap kesehatan manusia. Tujuannya adalah menyediakan informasi lengkap bagi pengelolaan risiko, atau pengelola lingkungan, seperti pembuat kebijakan dan regulasi, agar keputusan terbaik dapat diambil. Proses ini mengikuti kerangka standar dari EPA (AS) dan WHO, yang diadaptasi di Indonesia melalui Pedoman Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) Kementerian Kesehatan RI (2012). Tahapannya iteratif, melibatkan data ilmiah, model matematis, dan pertimbangan ketidakpastian, untuk mendukung pengambilan keputusan seperti regulasi atau mitigasi. Di Indonesia, ARKL diterapkan untuk isu seperti pencemaran air atau udara, selaras dengan SDG 3 (Kehidupan Sehat dan Sejahtera).

Penilaian risiko Kesehatan mencakup tahapan identifikasi bahaya, evaluasi pajanan, analisis dosis dan respons, serta karakterisasi risiko (Gambar 4). Sedangkan analisis risiko secara keseluruhan mempunyai cakupan lebih luas, dan tidak hanya asesmen atau penilaian, tetapi juga

langkah-langkah seperti identifikasi risiko dan manajemen risiko termasuk rekomendasi mitigasinya.

Tahap identifikasi bahaya bertujuan untuk menentukan apakah zat atau stressor di lingkungan (misalnya, logam berat seperti merkuri atau pestisida) memiliki potensi menyebabkan efek buruk pada kesehatan, berdasarkan bukti ilmiah. Pelaksanaannya melibatkan pengumpulan data dari studi toksikologi, epidemiologi, dan kasus nyata dari literatur.

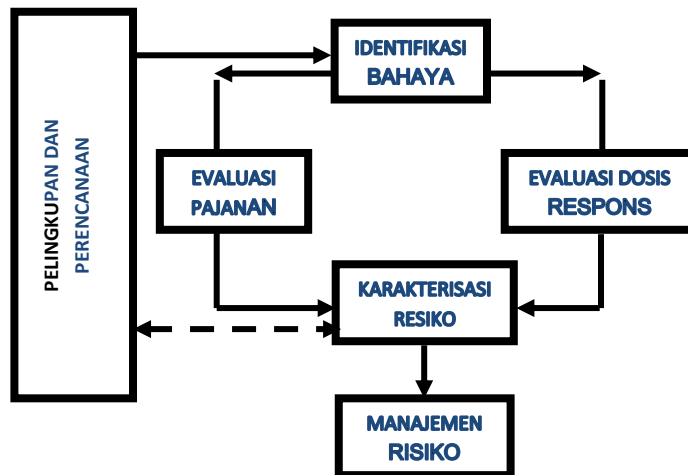
Tahap evaluasi pajanan adalah mengukur atau memperkirakan seberapa sering, berapa banyak, dan melalui jalur apa (inhalasi, ingesti/oral, dermal) populasi terpapar bahaya. Pelaksanaannya berbasis data empiris melalui data kepada responden dan melalui model untuk menghitung dosis aktual. Termasuk di dalam tahap ini adalah melakukan evaluasi keberadaan zat xenobiotik di lingkungan, dan melalui jalur mana dia akan memajani manusia. Pada tahap ini perlu diketahui perjalanan zat akan bergerak kemana, sehingga kemudian dapat memajani manusia/organisme. Selain itu, dapat diidentifikasi atau diperkirakan populasi yang rentan atau akan mengalami dampak lebih besar, seperti pada kelompok populasi anak-anak atau lansia, atau sub-grup pada populasi yang mungkin memberikan respons yang lebih sensitif terhadap efek.

Tahap ketiga adalah evaluasi dosis respons yang berfungsi untuk menganalisis hubungan antara dosis zat/xenobiotik dan tingkat respons biologis (efek kesehatan). Dari pengetahuan kurva dosis dan respons, dapat dianalisis untuk menentukan ambang batas aman. Pelaksanaannya menggunakan data eksperimen hewan (bioasay) untuk didapat nilai dosis aman. Nilai aman dari data hewan ini kemudian dapat diekstrapolasi untuk mendapat *safe human dose* dengan memasukkan *safety factor* yang sesuai. Data ambang batas aman seperti RfD (*Reference dose*) untuk berbagai xenobiotik ini dapat diperoleh dari database beberapa Lembaga, seperti EPA, IARC, dll.

Tahap karakterisasi risiko, adalah tahap akhir yang mengintegrasikan hasil tiga tahap sebelumnya untuk menyimpulkan tingkat risiko keseluruhan, termasuk probabilitas dan ketidakpastiannya. Pelaksanaannya menghasilkan narasi ringkas untuk evaluasi status risiko dan pengambilan keputusan.

Keseluruhan proses pada penilaian risiko melibatkan pengumpulan data untuk mengidentifikasi dan mengukur risiko, dengan penekanan pada

penggunaan informasi terbaik yang tersedia meskipun harus memahami adanya ketidakpastian dari data dan informasi yang digunakan, khususnya terkait keadaan setempat yang specific. Dengan kondisi setiap Lokasi yang berbeda, baik dari segi keberadaan zat/xenobiotik atau *stressor* (termasuk polutan/pencemar di lingkungan), karakteristik area (tutupan lahan, air, udara, tanah, sedimen, iklim, suhu, dll.), serta keberadaan populasi manusia atau ekosistem, maka setiap penilaian risiko memiliki potensi ketidakpastian dari data yang digunakannya. Ketidakpastian dalam penilaian risiko ini harus diidentifikasi, dikelola, dan dijelaskan secara transparan kepada pemangku kepentingan untuk membangun kepercayaan dan akuntabilitas dari hasil estimasi risiko yang diperoleh.



Gambar 4 Tahapan Analisis Risiko (Soemirat, 2013)

### 3.2 Karakterisasi Risiko

Dengan banyaknya jenis xenobiotik dan senyawa kimia di sekitar kehidupan manusia, maka dampak atau efek dari xenobiotik juga dapat beragam. Dalam penentuan karakterisasi risiko kesehatan manusia, efek yang terjadi akan dihitung menjadi dua kategori efek, yaitu efek nonkarsinogen (tidak menyebabkan kanker), dan efek karsinogen (menyebabkan kanker). Untuk penilaian karakterisasi risiko ini, khususnya risiko nonkarsinogen akan dihitung perkiraan risiko sebagai *Hazard Quotient* (HQ), atau *Risk Quotient* (RQ), ataupun HI (hazard Index), yang dihitung berdasarkan persamaan berikut:

$$HQ = \text{Dosis Paparan} / \text{RfD} \quad (3.1)$$

RfD (*Reference dose*) adalah perkiraan dosis harian suatu zat yang tidak menimbulkan efek kesehatan yang merugikan. Sedangkan HI dihitung bila terdapat paparan dari berbagai xenobiotik atau dari berbagai rute paparan:

$$HI = \sum HQ_i \text{ (jumlah Hazard Quotient untuk setiap zat } i) \quad (3.2)$$

Untuk risiko karsinogen, maka yang dihitung adalah ECR (*excess cancer risk*), atau ELCR (*Excess Lifetime Cancer Risk*), yang merupakan perkalian antara paparan dengan *slope factor* (SF) untuk spesifik jenis xenobiotik yang tergolong karsinogen:

$$ECR = \text{Dosis Paparan} \times \text{SF} \quad (3.3)$$

Efek karsinogen dinyatakan tidak mempunyai ambang batas, sehingga nilai ECR yang diperoleh merupakan probabilitas atau kemungkinan akan mengembangkan kanker tambahan seumur hidup akibat adanya paparan tersebut.

Pengertian hasil nilai risiko nonkarsinogen dinyatakan sebagai:

- Jika  $HQ < 1$ , risiko nonkarsinogenik dianggap dapat diterima atau kecil kemungkinannya menimbulkan efek kesehatan yang merugikan.
- Jika  $HQ > 1$ , ada kemungkinan efek kesehatan nonkarsinogenik yang merugikan, dan tindakan lebih lanjut mungkin diperlukan.

Sedangkan untuk hasil nilai risiko kanker, maka umumnya (seperti yang digunakan di EPA) mempertimbangkan tingkat risiko karsinogenik di bawah  $10^{-6}$  hingga  $10^{-4}$  sebagai tingkat yang dapat diterima. Pengertian dari nilai risiko  $10^{-6}$  adalah berarti 1 dari 1.000.000 orang kemungkinan akan mengembangkan kanker tambahan seumur hidup akibat paparan tersebut.

Nilai-nilai referensi seperti RfD, dan *cancer slope factor* didapatkan dari sumber data base yang dikeluarkan berbagai institusi seperti *Integrated Risk Information System* (IRIS) dari US EPA, dan *Agency for Toxic Substances and Disease Registry* (ATSDR), dari sumber lembaga riset. Pada kondisi ketiadaan data RfD atau *slope factor*, maka diperlukan penelitian khusus seperti penelitian toksikologi dan uji toksisitas pada hewan uji. Selain itu, penelitian epidemiologi pada populasi manusia dapat direncanakan dengan memperhatikan paparan yang ada untuk xenobiotik tersebut. Penelitian

epidemiologi sering kali dilakukan di lingkungan kerja, karena sering kali manusia atau pekerja mendapat paparan xenobiotik baru di lingkungan kerja yang menggunakan bahan tersebut. Kedua penelitian baik toksikologi pada hewan uji ataupun penelitian epidemiologi dapat dilakukan apabila penelitian sudah mendapat persetujuan etika menggunakan objek studi makhluk hidup dari Lembaga berwenang. Informasi hasil penelitian toksikologi dan epidemiologi ini akan digunakan untuk penentuan nilai-nilai standar baku yang aman dari konsentrasi atau dosis xenobiotik.

Untuk penilaian risiko lingkungan atau risiko ekologi, maka perhitungan perkiraan risiko hanya memperhitungkan konsentrasi yang ada di lingkungan, dan dibandingkan dengan nilai konsentrasi yang tidak memberikan gangguan, seperti ditunjukkan pada persamaan berikut:

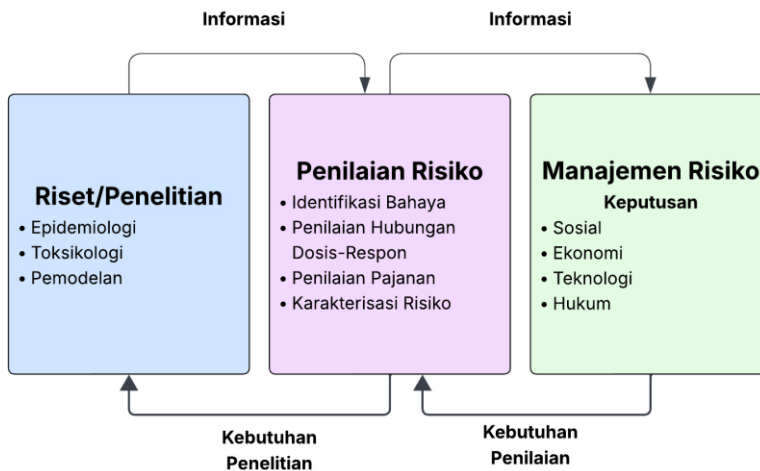
$$HQ = EC / NOEC \text{ (atau PNEC)} \quad (3.4)$$

EC adalah konsentrasi paparan lingkungan (*Environmental Concentration/EC*) dibandingkan dengan Konsentrasi Tanpa Efek Teramati (*No Observed Effect Concentration/NOEC*) atau Konsentrasi Efek Terendah yang Diamati (*Lowest Observed Effect Concentration/LOEC*) atau Konsentrasi Prediksi Tanpa Efek (*Predicted No Effect Concentration/PNEC*). Data NOEC atau PNEC dapat diperoleh dari berbagai Lembaga penelitian ekotoksikologi. Pengertian nilai HQ pada risiko ekologi atau lingkungan yang diperoleh, sama dengan penilaian risiko Kesehatan, yaitu apabila nilai  $HQ > 1$ , maka mempunyai kemungkinan risiko merugikan.

### 3.3 Penilaian dan Manajemen Risiko

Seperti telah dijelaskan pada tahapan penilaian risiko, pelaksanaan dan proses analisis risiko akan memerlukan berbagai informasi dan riset yang mendukung untuk penentuan tingkat bahaya, penilaian dan evaluasi paparan, serta hubungan dosis dan respons. Penelitian toksikologi baik akut, subkronis, atau kronis akan diperlukan seperti sudah disampaikan sebelumnya. Begitu pula penelitian epidemiologi yang dilakukan langsung di masyarakat atau manusia akan memberikan informasi sangat penting dalam penilaian risiko. Dengan kata lain, penilaian risiko dijalankan dengan berdasarkan kajian ilmiah. Pengetahuan keberadaan xenobiotik di lingkungan sebagai sumber paparan bagi organisme juga sangat krusial,

sehingga dapat melibatkan pengambilan data primer di lapangan, atau juga melakukan pemodelan prediksi fate xenobiotik di alam (Gambar 5).



**Gambar 5** Paradigma Analisis Risiko

Hasil penilaian karakterisasi risiko untuk selanjutnya akan menjadi sumber informasi yang menentukan apakah manajemen risiko diperlukan, ketika nilai risiko yang diperoleh tidak dapat diterima atau ditoleransi. Untuk proses manajemen risiko, maka mempunyai tahapan sebagai berikut (Soemirat, 2013):

- Formulasikan masalah dalam konteksnya secara luas,
- Evaluasi analisis risiko,
- Definisikan opsi/alternatif untuk menurunkan risiko,
- Pengambilan keputusan alternatif tindak lanjut yang terbaik,
- Implementasi rencana tindak lanjut, dan
- Evaluasi hasil implementasi.

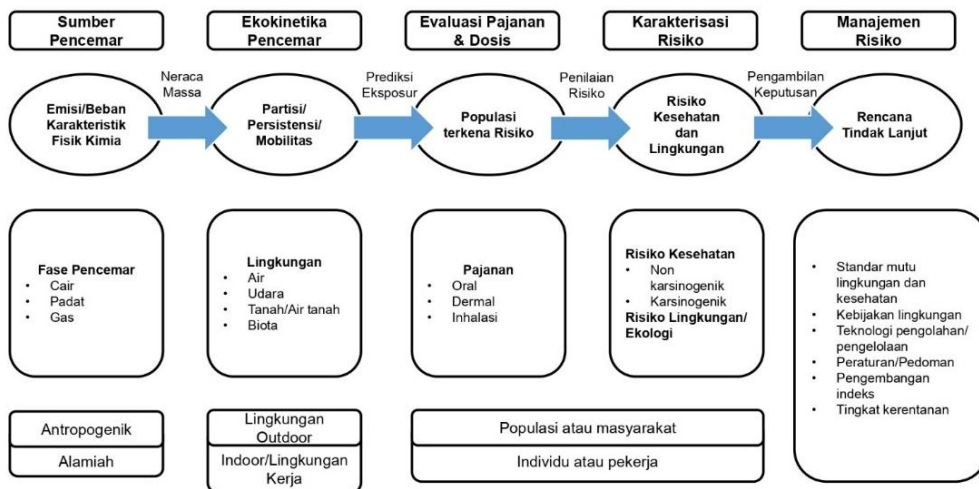
Semua tahapan pada manajemen risiko akan melibatkan pemangku kepentingan pada kasus atau permasalahan yang ditinjau. Pemangku kepentingan ini dapat terdiri atas unsur pemerintah daerah, industri dan pengusaha, kelompok/tokoh masyarakat, dinas-dinas terkait, dinas kesehatan, organisasi masyarakat, lembaga penelitian, dll., tergantung dari lingkup jenis kegiatan. Bentuk manajemen risiko dapat berupa penentuan teknologi remediasi untuk menurunkan pencemaran di lingkungan, dapat berupa peraturan seperti pelarangan konsumsi produk dari area tercemar,

edukasi kepada masyarakat, evaluasi kembali kesesuaian standar lingkungan yang ada, atau dapat dipergunakan untuk pemilihan atau prioritas area/daerah yang memerlukan perbaikan, termasuk pengembangan-pengembangan metode baru dalam pengambilan keputusan dan kebijakan, dan lain-lain kegunaan yang melibatkan sosial masyarakat, termasuk finansial.

Untuk keberhasilan menurunkan risiko melalui tindak lanjut terpilih, maka semua pemangku kepentingan harus menyepakati dan mempunyai persepsi, dan kontribusinya sesuai peran masing-masing. Dengan keterlibatan berbagai pihak dalam proses manajemen risiko, maka pelaksanaannya lebih didasarkan pada aspek kesiapan implementasi kegiatan mitigasi risikonya.

Untuk kemudahan analisis permasalahan, evaluasinya, dan mungkin prioritas alternatif, maka data hasil karakterisasi risiko dapat disajikan dan dihubungkan dengan pemetaan spasial dan temporal. Metode analisis dan presentasi data lainnya yang membantu mengkomunikasikan risiko yang ada, akan sangat bermanfaat sebagai sumber informasi yang secara komprehensif dari permasalahan yang ada. Hal ini akan membantu penentuan pengelolaan dan manajemen risiko atau lingkungan selanjutnya.

Bentuk manajemen risiko dapat beragam sesuai pertimbangan holistik, termasuk membuat regulasi, edukasi, teknologi remediasi, kebijakan, dll. untuk menurunkan risiko. Pada tahap ini banyak faktor lain selain pertimbangan ilmiah yang dapat diambil. Keputusan manajemen risiko diambil dengan memperhatikan kelayakan secara sosial, ekonomi, teknologi, dan juga penerimaan seluruh pemangku kepentingan. Pemilihan kegiatan pada manajemen risiko sudah memerlukan peninjauan dan pertimbangan untuk dapat diterapkan secara efektif, efisien, dan dapat diterima oleh semua pemangku kepentingan. Gambar 6 menggambarkan secara garis besar, prinsip dan proses penilaian risiko kesehatan dan lingkungan dari mulai adanya sumber pencemar sampai kepada pemanfaatannya dalam manajemen risiko.



**Gambar 6** Lingkup dan prinsip dalam penilaian risiko kesehatan dan lingkungan

Dengan mempertimbangkan tahapan analisis dan penilaian risiko di atas, maka pembahasan pada buku ini akan mencakup hasil penelitian yang telah dilakukan mengikuti uraian yang disusun sebagai berikut:

1. Sumber dan Jenis Xenobiotik
2. Perjalanan Xenobiotik di Lingkungan
3. Paparan Xenobiotik terhadap Organisme dan Manusia
4. Kualitas dan Kuantitas Dampak/Efek
5. Penilaian Risiko Kesehatan dan Lingkungan
6. Tantangan Penilaian Risiko Kesehatan dalam Pengelolaan Lingkungan Berkelanjutan

## 4 SUMBER KEGIATAN DAN JENIS XENOBIOTIK

### 4.1 Sumber Kegiatan Penghasil Bahaya Lingkungan

Kegiatan manusia dari dahulu kala sampai sekarang telah mengalami banyak perubahan sesuai dengan budaya dan teknologi yang berkembang sesuai zaman. Awal kegiatan dasar manusia adalah kegiatan domestik sehari-hari, dengan kebutuhan dasar sandang, pangan, dan papan yang standar dan sederhana. Budaya manusia purba, yang asalnya nomaden sesuai ketersediaan sumber makanan, kemudian dapat menetap karena kemampuan dan budaya bercocok tanam. Dengan penemuan-penemuan peralatan dan teknologi, kemudian tumbuhlah era industri dan industrialisasi. Semua teknologi dikembangkan karena untuk pemenuhan kebutuhan manusia, dan peningkatan taraf hidup dan kesejahteraan manusia. Manusia merasa dapat menaklukkan alam, dan mengeksploitasi sumber daya ekosistem di muka bumi. Kesejahteraan dan pendapatan per kapita meningkat, dan banyak negara menjadi maju dan modern.

Perkembangan bahan kimia dimulai dari digunakannya bahan kimia alami, kemudian ditemukan pemanfaatan logam tembaga, emas, dan lain-lain. Pada era industrialisasi kemudian berkembang pula materi sintetis, mulai dari asam, sabun dan deterjen, pupuk dan pemutih, termasuk bahan peledak. Pada tahun 1940-an, setelah Perang Dunia I, DDT (dikloro-difenil-trikloretena) dikembangkan sebagai insektisida sintetis modern pertama. Awal digunakannya DDT mempunyai efektivitas tinggi untuk memerangi malaria, tifus, dan penyakit menular serangga lainnya di kalangan populasi militer maupun sipil. Selain itu, DDT juga efektif untuk pengendalian serangga dalam produksi tanaman dan peternakan, institusi, rumah tangga, serta taman.

Dengan meningkatnya bahan kimia sintetis dan juga limbah ke lingkungan, perubahan kualitas lingkungan kemudian tampak di muka bumi. Langit berwarna, hutan berkurang, air permukaan penuh dengan sampah dan tercemar berbagai materi organik, non-organik yang jumlahnya beragam, merupakan contoh perubahan kualitas lingkungan yang terlihat. Padahal pencemaran lingkungan tidak selalu terlihat dan dirasakan oleh pancaindra, karena kandungan xenotiotik bisa terlarut dalam air, terdispersi di

lingkungan udara, dan terkandung di dalam tanah, air tanah, dan biota, yang kesemuanya tidak terlihat secara kasat mata.

DDT sebagai pestisida dinilai sukses memberantas penyakit dan serangga, kemudian penggunaannya meluas di Amerika Serikat serta negara-negara lain. Masalah lingkungan mulai menjadi perhatian serius beberapa dekade setelah penggunaan luas DDT. Senyawa organoklorin ini dikenal karena toksisitas tinggi, degradasi yang lambat, dan dapat mengalami bioakumulasi. Rachel Carson, pada 1962 menerbitkan buku *Silent Spring*, yang menunjukkan terjadinya musim semi yang sepi, karena dampak DDT yang merusak pada lingkungan dan satwa liar, terutama burung, dan memicu dimulainya gerakan lingkungan modern. DDT sebagai pestisida yang persisten kemudian dilarang penggunaannya oleh US EPA tahun 1972.

Saat ini banyak ditemukan dalam lingkungan perairan, udara, dan juga tanah dan biota yang mengakumulasi POPs (*persistent organik pollutants*), dari banyak kegiatan manusia seperti industri, pertanian, transportasi, energi, dll. *Emerging pollutants* (EPs) adalah zat kimia yang baru diidentifikasi sebagai ancaman potensial terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Contoh-contoh EPs ini di antaranya adalah obat-obatan dan produk farmasi, produk perawatan pribadi, bahan-bahan nano, mikroplastik, pestisida baru, dll. Sementara POPs adalah senyawa organik yang sangat persisten di lingkungan atau sulit diuraikan, dan dapat terakumulasi dalam jaringan hidup. Berdasarkan Konvensi Stockholm, zat yang tergolong POPS adalah pestisida (*organohalogenated compounds*, seperti DDT, dieldrin, aldrin, dll.), bahan kimia industri (contohnya PCBs-poly chlorinated biphenils, HCB-hexachlorobenzene, dll.), produk samping industri (seperti dioxin, dan furan).

Dengan banyaknya produk dan barang yang digunakan manusia, sumber xenobiotik juga dapat ditemukan di rumah-rumah. Kegiatan memasak, membersihkan, konstruksi, dan kebiasaan merokok, menjadi sumber-sumber xenobiotik di dalam rumah. Bahkan beberapa pekerjaan dan mata pencaharian yang dilakukan di dalam atau sekitar rumah dapat memberi kontribusi pajanan xenobiotik bagi organisme. Sebagai contoh kegiatan daur ulang limbah elektronik, praktek penambangan emas rakyat, karena skala rumah tangga sering memberi potensi emisi xenobiotik di lingkungan rumah.

Berikut contoh-contoh kegiatan sumber xenobiotik dan jenis-jenis xenobiotik yang sering ditemukan (Tabel 1 dan Tabel 2).

**Tabel 1** Contoh xenobiotik dari sumber aktivitas manusia

| Jenis Xenobiotik          | Contoh Senyawa                             | Sumber Aktivitas Manusia   |
|---------------------------|--|--|
| Pestisida                 | DDT, Atrazine, Organofosfat, Carbamat      | Pertanian, perkebunan, dan pengendalian vektor penyakit                              |
| Farmasetika               | Ibuprofen, Paracetamol, Antibiotik, Hormon | Limbah farmasi, rumah sakit, dan penggunaan pribadi (Freitas & Radis-Baptista, 2021) |
| Bahan Kimia Industri      | PCB, BPA, Phthalates                       | Manufaktur plastik, cat, dan elektronik  |
| Logam Berat               | Timbal (Pb), Merkuri (Hg), Kadmium (Cd)    | Pertambangan, industri baterai, dan pembakaran bahan bakar fosil                     |
| Produk Sampingan Industri | Dioxin, Furan                              | Pembakaran limbah, produksi kertas, dan insinerator                                  |
| Plastik dan Aditifnya     | Mikroplastik, BPA, DEHP                    | Kemasan makanan, tekstil, dan limbah domestik (Thompson et al., 2009)                |

**Tabel 2** Xenobiotik yang didapatkan dari kegiatan domestik

| Kategori               | Contoh Xenobiotik                                | Sumber Spesifik                                  |
|------------------------|--|--|
| Produk Pembersih       | Triclosan, Alkylphenol ethoxylates               | Sabun antibakteri, deterjen (Yueh & Tukey, 2016) |
| Kosmetik               | Paraben, Phthalates, Natrium lauril sulfat (SLS) | Losion, cat kuku, deodoran, sabun                |
| Elektronik Rumahan     | Timbal (Pb), Kadmium (Cd)                        | Daur ulang informal PCB, CRT monitor             |
| Kemasan Makanan        | BPA, PFAS  | Wadah plastik, kemasan anti-lengket              |
| Obat Kadaluwarsa       | Antibiotik, Analgesik                            | Pembuangan obat melalui toilet                   |
| Pestisida Rumah Tangga | Pyrethroid, Organofosfat                         | Obat nyamuk, antiserangga                        |

Selain adanya bahaya berupa bahan kimia atau xenobiotik, maka risiko Kesehatan dan lingkungan dapat bersumber pula dari stressor seperti zat fisika seperti suhu, radiasi (pengion dan non-pengion), getaran, dll. Yang dapat memajani manusia, baik dari lingkungan ambien maupun lingkungan *indoor* seperti dari rumah dan lingkungan kerja.

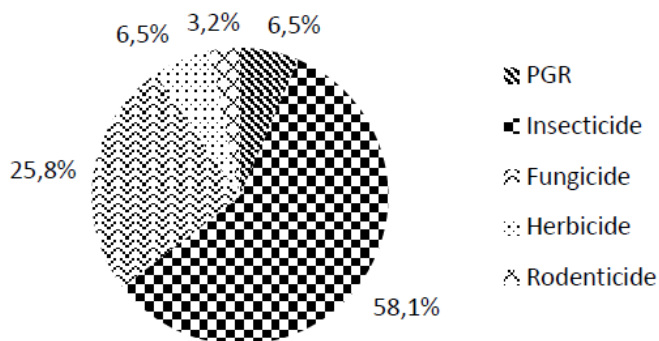
## 4.2 Hasil Penelitian Terkait Jenis Bahaya di Lingkungan

Hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan dan mendapatkan jenis bahaya dan xenobiotik dari lingkungan sebagai berikut:

- Informasi mengenai jenis penggunaan pestisida dan penggunaan pestisida diperlukan untuk memperkirakan emisi pestisida di air permukaan. Survei kuesioner tentang penggunaan pestisida oleh petani dilakukan di area pertanian DAS Citarum Hulu. Hasil survei menunjukkan

bahwa 31 pestisida digunakan oleh petani dengan jenis pestisida insektisida (58%) sebagai yang paling banyak digunakan oleh petani. Secara keseluruhan, Profenofos dan Mancozeb memiliki penggunaan terluas. Untuk tanaman padi, insektisida berbasis Karbamat dan Piretoid seperti Karbofuran dan Deltamethrin adalah pestisida yang paling sering disebutkan oleh petani (Utami, dkk. 2020a).

- Penelitian di daerah pertanian di DAS Citarum Hulu mendapatkan bahwa 90% petani menggunakan pestisida. Jenis-jenis pestisida yang digunakan terlihat dalam Gambar 7. Teridentifikasi dari survei terdapat 31 jenis pestisida digunakan dengan pestisida Macozeb dan Profenofos yang terbanyak dipakai. Untuk tanaman cabe dan tomat. Tercatat pula dua pestisida yang sudah dilarang (Endosulfan dan Klorpirifos) masih digunakan oleh petani (Utami, dkk., 2020b).



**Gambar 7** Jenis pestisida yang digunakan di pertanian di area Citarum Hulu (Utami, dkk., 2020b)

- Dideteksi adanya distribusi konsentrasi piretroid dalam air tanah di dekat Sungai Citarum dalam kaitannya dengan jarak dari sungai. Dari sembilan piretroid yang diuji, lima terdeteksi dalam sampel Sungai Citarum, dan semuanya ditemukan dalam sampel sumur air tanah, melebihi konsentrasi maksimum yang diizinkan. Allethrin dan  $\beta$ -cyfluthrin terdeteksi di semua sampel air pada konsentrasi masing-masing 101–264 ng/L dan 12–58 ng/L. Meskipun konsentrasi allethrin menurun seiring dengan meningkatnya jarak dari sungai dan meningkat seiring dengan menurunnya elevasi, tidak ditemukan korelasi signifikan antara jarak, elevasi, dan konsentrasi allethrin. Tidak ada pola yang jelas diamati untuk  $\beta$ -cyfluthrin dalam sampel sungai dan air tanah. Selain itu, baik allethrin

maupun  $\beta$ -cyfluthrin tidak menunjukkan korelasi signifikan dengan kedekatan dengan area pertanian, menunjukkan bahwa sumber kontaminasi mungkin tidak hanya terkait dengan aktivitas pertanian (Fahimah, dkk., 2025).

- Paparan pestisida primer dan sekunder di rumah dapat memengaruhi kesehatan masyarakat termasuk anak-anak dari petani, yang dapat meningkatkan risiko paparan pestisida di lingkungan tempat tinggal. Paparan pestisida lebih banyak memengaruhi anak-anak daripada orang dewasa. Kualitas lingkungan mendorong perubahan pola masalah kesehatan utama anak-anak, dari penyakit menular menjadi penyakit kronis. Organ anak-anak yang sedang berkembang mungkin terpapar konsentrasi rendah pestisida yang mengganggu lingkungan seperti organofosfat, organoklorin, karbamat, dan piretroid. Beberapa kelompok metabolit pestisida menginduksi dan menghambat pertumbuhan dan perkembangan pada anak-anak (Deviyani, 2024).
- Kualitas efluen dari TPA Sarimukti yang masuk ke anak sungai Citarum, terukur logam berat seperti Cu, Pb, Fe, dan Zn, di samping mempunyai kandungan BOD sekitar 500 mg/L, dan COD 2000 mg/L, yang juga menurunkan DO di sungai menjadi  $< 2$  mg/L (Salami dan Rizaldi, 2016).
- Sungai Citarum merupakan sungai yang tercemar dari kegiatan pertanian, industri, dan permukiman. Partikel mikroplastik, sebagai *emerging pollutant*, ditemukan di semua sampel sedimen dengan konsentrasi mikroplastik rata-rata 15,7 partikel / 100 g sedimen basah. Konsentrasi mikroplastik tertinggi ditemukan di stasiun pengambilan sampel Nanjung. Sumber potensial pencemaran mikroplastik di Sungai Citarum Hulu adalah aktivitas industri tekstil dan akumulasi sampah plastik. Jenis partikel mikroplastik yang teridentifikasi di Sungai Citarum Hulu adalah serat dan fragmen dengan ukuran dominan 1001 - 5000  $\mu\text{m}$  (Adrian and Roosmini, 2024).
- Keberadaan ftalat (phthalic acid esters/PAE) dalam matriks air dapat menimbulkan potensi risiko kesehatan. Konsentrasi dua PAE, yaitu dibutil ftalat (DBP) dan benzil butil ftalat (BBP), pada sumber air tanah di Kampung Daraulin, Kabupaten Bandung. Konsentrasi PAE tertinggi yang ditemukan dalam air tanah dan air permukaan masing-masing adalah 4,5  $\mu\text{g/L}$  dan 22,18  $\mu\text{g/L}$  (Faathir Chalid dan Nastiti, 2025).

- Begitu pula dengan lingkungan udara ambien, terdeteksi logam berat pada  $PM_{2,5}$  yang diukur di area industri, di Kabupaten Bandung. Ada 17 jenis unsur yang teridentifikasi dalam sampel  $PM_{2,5}$  yang diambil dari kawasan industri Dayeuhkolot. Berdasarkan konsentrasi unsur-unsur yang teridentifikasi dalam debu  $PM_{2,5}$ , diketahui bahwa  $Zn > Ti > Ag > S > Si > Fe > Mg > Ni > Sn > V > Sb > Cr > Pb > Hg > Cd > Se > As$  (Herwiandani, 2024).
- Monitoring kualitas lingkungan udara di area pertanian, industri, dan permukiman mencatat parameter  $PM_{2,5}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ , CO, dan  $O_3$ , dengan area industri mempunyai konsentrasi yang lebih tinggi daripada kedua area lainnya (Pratiwi, 2024).

Selain dideteksi xenobiotik di lingkungan ambien atau *outdoor*, maka beberapa penelitian berikut mengidentifikasi adanya sumber bahaya dari lingkungan *indoor* atau lingkungan kerja, baik dari faktor fisika, maupun kimia:

- Konsentrasi  $PM_{2,5}$  dan komposisi logam berat di bengkel pandai besi di Kabupaten Bandung, menunjukkan konsentrasi yang secara signifikan meningkat, berkisar dari  $166,88 \mu\text{g}/\text{m}^3$  hingga  $513,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , yang jauh melebihi rekomendasi kualitas udara dalam ruangan dari WHO. Analisis kimia mengungkapkan logam berat toksik dalam  $PM_{2,5}$ , termasuk besi (Fe), kromium (Cr), nikel (Ni), mangan (Mn), seng (Zn), dan timbal (Pb), dengan konsentrasi total logam berat yang bervariasi secara signifikan antar bengkel (Oginawati, dkk., 2024).
- Adanya paparan timbal pada pekerja batik tradisional di Yogyakarta, dan memapari melalui jalur dermal dan inhalasi (Oginawati., dkk., 2023).

## 5 PERJALANAN DAN NASIB XENOBIOTIK DI LINGKUNGAN

### 5.1 Proses Transportasi dan Transformasi Xenobiotik

Xenobiotik yang diemisikan ke lingkungan dari sumbernya, akan masuk ke lingkungan, baik lingkungan air, udara, dan tanah. Selama di lingkungan xenobiotik dapat mengalami perpindahan atau transportasi dan juga perubahan bentuk atau transformasi. Proses transportasi di lingkungan atau ekokinetika dipengaruhi oleh berbagai faktor dari :

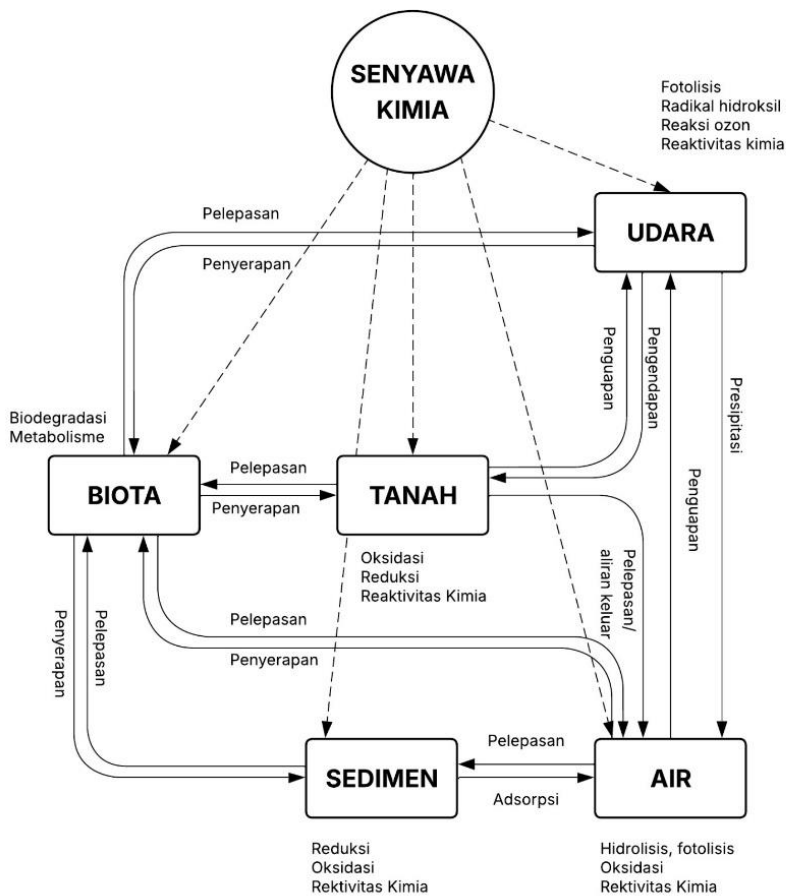
- bahan kimia atau xenobiotik, seperti karakteristik fisika-kimia, kelarutan, koefisien partisi, dll.
- kondisi lingkungan : suhu, iklim, tekanan, keberadaan bahan kimia lain, dll.

Sedangkan proses transformasi xenobiotik di lingkungan dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti :

- karakteristik fisika-kimia xenobiotik
- proses fisika (reaksi dipengaruhi suhu, radiasi cahaya matahari, dll.); kimia (proses fotokimia, oksidasi-reduksi, hidrolisis), dan mikrobiologi (biodegradasi)
- interaksi dengan organisme/biota: bioakumulasi, biokonsentrasi, biomagnifikasi.

Keberadaan xenobiotik di lingkungan untuk selanjutnya dapat terbagi dalam kompartemen di lingkungan, yaitu air, udara, tanah, dan air tanah yang kemudian juga dapat memajani organisme, sehingga xenobiotik juga dapat ditemukan di biota. Proses transportasi dan transformasi berlangsung pada masing-masing kompartemen, dan dapat terjadi antar kompartemen seperti ditunjukkan pada Gambar 8.

Pada penilaian risiko lingkungan dan kesehatan, prediksi perilaku xenobiotik di lingkungan menjadi penting, karena akan menentukan di mana suatu xenobiotik akan berada setelah memasuki lingkungan. Di kompartemen mana, pada konsentrasi berapa? Keberadaannya di lingkungan apakah dia *bioavailable*, atau tidak, untuk kemudian akan memajani dan memasuki organisme yang berada pada kompartemen tersebut.



**Gambar 8** Proses perpindahan dan transformasi senyawa kimia di lingkungan (Calamari, 1996)

Beberapa xenobiotik mempunyai potensi untuk mengalami biokumulasi dalam biota atau organisme. Bioakumulasi terjadi karena xenobiototik tidak dapat dikeluarkan atau dimetabolisme sehingga terakumulasi dan konsentrasinya meningkat dalam tubuh organisme melebihi konsentrasi di lingkungannya. Bioakumulasi xenobiotik dalam organisme meningkatkan potensi untuk memasuki organisme lain melalui proses rantai makanan. Dari kemungkinan rute rantai makanan inilah yang memberikan potensi bagi manusia untuk dapat terpajan xenobiotik selain dari eskposur dari lingkungan seperti air, udara, dan tanah. Xenobiotik dapat memasuki manusia melalui rute oral, dermal, atau inhalasi, termasuk melalui makanan (oral).

Manusia terpajan xenobiotik tidak hanya dari lingkungan di luar rumah (*outdoor*), tetapi polutan ditemukan pula di dalam rumah atau kegiatan *indoor*

termasuk dari industri, tempat kerja, dll. Oleh karena itu pajanan seorang manusia bisa berasal bukan saja dari lingkungan luar, tetapi dari kegiatan di dalam ruangan, termasuk kegiatan domestik dapat memberi pajanan kepada manusia dengan dipakainya berbagai produk dalam berbagai aktivitas di dalam rumah, yang tergolong berbahaya, seperti penggunaan pembersih, deterjen, obat nyamuk, ataupun kebiasaan merokok, dan lainnya. .

## 5.2. Hasil Penelitian Mengenai Perjalanan Xenobiotik

Hasil penelitian yang menunjukkan adanya perjalanan xenobiotik dan akumulasi pada biota di antaranya didapatkan hasil sebagai berikut.

- Pengukuran air di anak Sungai Citarum dari titik pembuangan TPA Sarimukti ke arah Waduk Cirata, dengan jarak sampai 12 km, terlihat adanya penurunan konsentrasi TSS, TDS, pH, BOD, COD, Fe. Hal ini menunjukkan bahwa *outfall* dari TPA Sarimukti sebagai sumber pencemaran. Begitu pula untuk DO dari < 2mg/L meningkat seiring penambahan jarak dari TPA. Sedangkan untuk logam berat Cu dan Pb, sumber pencemar selain dari TPA terdeteksi dari hasil pengukuran (Salami dan Rizaldi, 2016).
- Perjalanan xenobiotik juga tergambarkan dari pemodelan konsentrasi pestisida di sungai sejalan dengan data penggunaan pestisida oleh petani di DAS Citarum Hulu. Validasi hasil dari pemodelan juga sesuai dengan hasil pengukuran pestisida dari pengukuran *passive sampler* yang diletakkan di daerah Ciwalengke (Utami, dkk., 2020c).



## 6 PAJANAN XENOBIOTIK TERHADAP ORGANISME DAN MANUSIA

### 6.1 Pengukuran Paparan

Semua makhluk hidup atau organisme termasuk manusia menempati satu bumi ini untuk kelangsungan hidupnya. Sementara bumi ini mempunyai status kondisi yang juga menerima limbah dan xenobiotik akibat aktivitas antropogenik. Beberapa lokasi di lingkungan kemudian dapat dikategorikan telah tercemar baik ringan, sedang, atau berat. Organisme pun kemudian terpapar xenobiotik dalam kehidupannya, sehingga berpotensi mendapat masukan atau *intake* xenobiotik ke dalam tubuhnya, baik melalui pintu masuk (*portal of entry*) oral (saluran pencernaan), inhalasi (mekanisme pernafasan), dan juga melalui paparan dermal (melalui kulit). Besaran *intake* ke dalam tubuh sangat bervariasi antar-organisme termasuk untuk manusia sesuai dengan kegiatan yang dijalaninya.

Perhitungan besaran intake secara umum diperkirakan dengan persamaan berikut: (enHEALTH, 2012)

$$I = \frac{C \times CR \times EFD}{BW} \times \frac{1 \times CF}{AT}$$

Di mana,

I = *intake* xenobiotik (mg/kg/hari)

C = rata-rata konsentrasi xenobiotik dalam media yang memajani manusia (misal mg/L, mg/kg, atau mg/m<sup>3</sup>)

CR = besaran laju kontak dengan media yang mengandung xenobiotik per unit waktu (misal L/hari)

EFD = frekuensi dan durasi paparan (misal berapa sering, berapa lama). Biasanya terbagi menjadi dua, yaitu EF = frekuensi paparan (misal hari/tahun); dan ED = durasi paparan (misal dalam berapa tahun)

BW = berat badan (kg)

AT = *averaging time* atau periode waktu paparan

CF = faktor konversi (untuk satuan *intake* yang diperlukan, sesuai dengan rute paparan, apakah melalui oral, inhalasi, ataupun dermal).

*Intake* diperkirakan dengan mempertimbangkan jumlah yang masuk, frekuensi, durasi, dan berapa lamanya suatu xenobiotik memajani organisme

tersebut. Konsumsi air minum, makanan, dan volume udara pernafasan, serta luas area kontak melalui kulit merupakan parameter yang dihitung atau diperkirakan. Besaran *intake* ini dipengaruhi juga oleh banyak faktor termasuk di dalamnya adalah kebiasaan dan cara hidup, status sosial dan ekonomi, dan faktor-faktor lain seperti fasilitas, infrastruktur, dan faktor budaya. Untuk perhitungan pajanan sering kali dipergunakan data *default* atau baku yang dikeluarkan oleh EPA atau lembaga lainnya. Misalnya, untuk banyaknya air minum yang dikonsumsi digunakan data *default*/baku sebesar 2 L/orang/hari untuk dewasa dan 1 L/orang/hari untuk anak-anak.

Penggunaan data intake dari *default* tentunya tidak selalu sesuai dengan yang sebenarnya terjadi di Lokasi studi, sehingga hal ini akan memberikan ketidakpastian dari penilaian risiko yang diperoleh nantinya. Untuk mengurangi ketidakpastian dalam pajanan ini, maka akan lebih baik mendapatkan data riil dari responden atau populasi studi. Untuk perhitungan menggunakan data riil ini, tingkat risiko dikategorikan sebagai perhitungan risiko Tier 2, yang artinya menggunakan data pajanan tambahan dari populasi yang distudi. Sementara kalau menggunakan data *default*, maka dikategorikan perhitungan risiko Tier 1. Penggunaan data Tier 2 pada perhitungan penilaian risiko, akan mengurangi faktor ketidakpastian. Selain penggunaan data pajanan dari populasi studi secara langsung, ketidakpastian dapat juga dikurangi dengan melakukan pengolahan data lanjutan menggunakan analisa statistik probabilistik, sehingga distribusi frekuensi pajanan atau hasil risiko pada populasi atau masyarakat dapat dilihat gambarannya secara lebih baik (enHEALTH, 2012)

## 6.2 Hasil Penelitian Terkait Evaluasi Pajanan

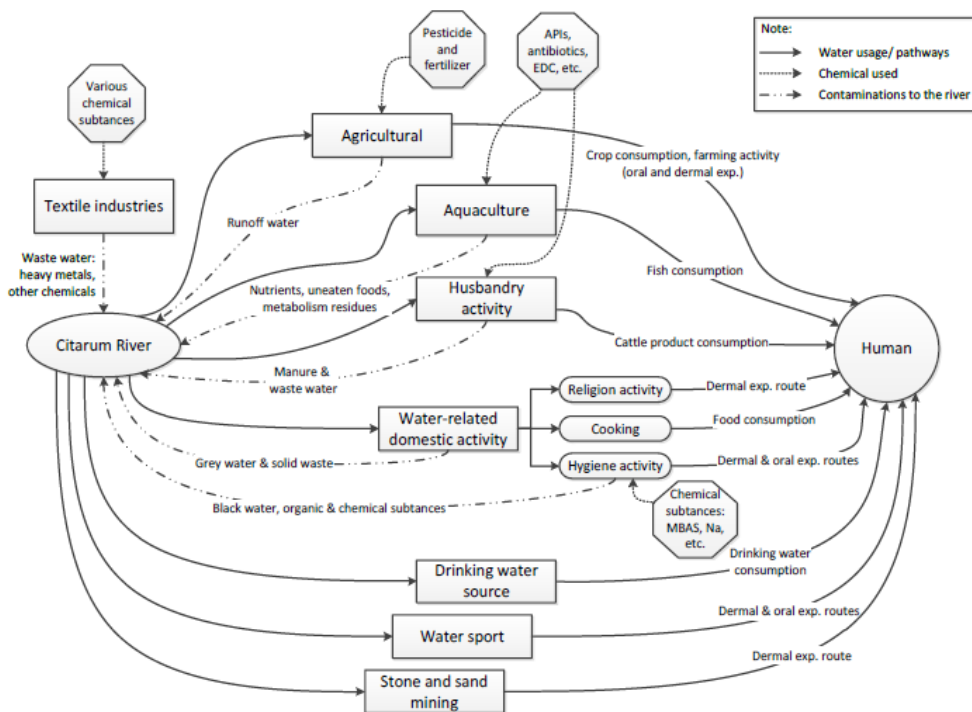
Evaluasi pajanan dilakukan dengan meninjau potensi pajanan yang terjadi dari sumber emisi xenobiotik dilepaskan, perjalanannya di lingkungan sampai kepada manusia atau organisme yang terpajan. Untuk itu, terdapat beberapa tahapan yang dilakukan (enHEALTH, 2012):

- Karakterisasi *setting* fisik
- Identifikasi populasi potensial terpajan
- Identifikasi jalur pajanan potensial
- Estimasi konsentrasi pajanan
- Estimasi *intake* kontaminan.

Pada kasus penelitian di Citarum, kontaminan dilepaskan ke dalam ekosistem air melalui berbagai aktivitas antropogenik, seperti pertanian, industri, akuakultur, peternakan, dan aktivitas kebersihan domestik. Perlu diketahui potensi perjalanannya di lingkungan untuk sampai ke manusia atau organisme melalui telaah *Conceptual Site Model* (CSM). Kemudian menentukan jalur pajanan yang akan terjadi, serta memperkirakan siapa atau masyarakat yang akan terdampak. Perhatian khusus akan diberikan kepada subgrup populasi yang rentan (*susceptible, vulnerable, dan sensitive group*). Bisa karena dipengaruhi oleh usia, gaya hidup, atau etnik grup yang mempunyai kebiasaan tertentu yang memberikan kemungkinan pajanan lebih tinggi, di samping juga kemungkinan efek yang lebih besar. Kuantitas pajanan kemudian akan diperkirakan sesuai dengan rute masuknya xenobiotik memajani populasi seperti oral, inhalasi, ataupun dermal.

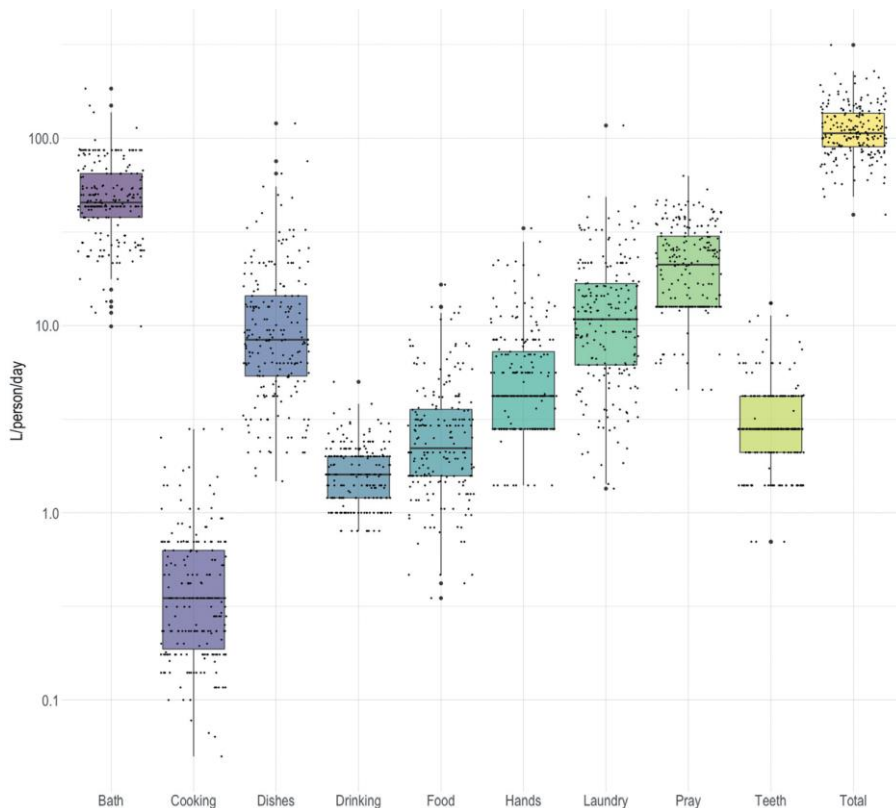
Kajian jalur pajanan untuk kasus pencemaran dari Sungai Citarum sampai ke manusia digambarkan dalam Gambar 9. Dari pajanan air sungai, maka xenobiotik diperkirakan dapat mengekspos manusia melalui berbagai jalur, seperti konsumsi air minum, konsumsi produk yang menggunakan air (misalnya, produk pertanian, akuakultur, dan peternakan), aktivitas domestik terkait air (misalnya, aktivitas keagamaan, memasak, dan kebersihan), olahraga air, dan pertambangan. Jalur pajanan kontaminan di Sungai Citarum mengarah pada penyerapan kontaminan melalui kulit (dermal) dan saluran gastrointestinal (oral) (Utami, dkk., 2023).

Secara umum, air bersih digunakan untuk minum, aktivitas kebersihan, memasak dan persiapan makanan, serta aktivitas dalam dan luar ruangan terkait air lainnya yang terjadi di sekitar rumah dan pekarangan seperti pemeliharaan unggas, mencuci mobil, dan berkebun. Suatu kajian untuk mengevaluasi jalur pajanan dari pemakaian air pada masyarakat yang tinggal di sekitar Sungai Citarum menunjukkan route pajanan seperti pada Gambar 9. Dari survei permintaan air, 60% responden menggunakan sumber air yang tidak aman untuk kebutuhan pribadi dan domestik ini. Hal ini mungkin disebabkan oleh kurangnya kesadaran dan pengetahuan tentang keamanan air (Utami, dkk., 2023).



**Gambar 9** Rute perjalanan kontaminan dari Sungai Citarum ke masyarakat (Utami, dll., 2023)

Sebagai contoh untuk pemakaian air dalam kehidupan yang sangat bervariasi antartempat, jenis kelamin, umur, dan kebiasaan. Utami, dkk. (2022) melakukan survei terhadap 217 responden di Ciwalengke, di area Citarum Hulu, Kabupaten Bandung. Melalui survei ini, dari kebiasaan pemakaian air didapatkan volume jumlah penggunaan air untuk berbagai kegiatan seperti mandi, masak, mencuci baju, mencuci peralatan makan, minum, menyiapkan makanan, sampai ke kebutuhan air untuk menyikat gigi dan juga wudu (Gambar 10). Informasi seperti ini akan dapat digunakan untuk perhitungan risiko kesehatan yang lebih baik, karena didapatkan langsung dari kuesioner masyarakat yang distudi, sehingga mengurangi ketidakpastian dari penggunaan data *default*/baku yang sudah ditetapkan.



**Gambar 10** Penggunaan air penduduk (L/orang/hari) di Area Ciwalengke Kabupaten Bandung (Utami, dkk. 2022).

Begitu pula dengan perhitungan pajanan lainnya seperti melalui *intake* atau asupan makanan akan sangat dipengaruhi dari kuantitas dan kualitas makanan yang dimakan. Hal ini termasuk apabila makanan mengandung xenobiotik karena adanya bioakumulasi dan magnifikasi. Pendekatan perhitungan perkiraan pajanan dari makanan relatif lebih kompleks karena jenis makanan dan jumlahnya yang sangat bervariasi antar-individu. Untuk data konsumsi makanan, data *intake* jumlah makanan yang dikonsumsi sering digunakan data *default* ataupun data dari hasil survei BPS (Badan Pusat Statistik), yang untuk beberapa jenis makanan besaran konsumsinya per orang dapat ditemukan.

Beberapa penelitian mengenai kandungan xenobiotik dalam makanan telah dilakukan dan dilaporkan. Hal ini terutama sering diperoleh dari data pengukuran konsentrasi xenobiotik pada makanan utama atau makanan spesifik yang dikonsumsi di daerah studi. Contohnya adalah mengukur

konsentrasi pencemar atau xenobiotik pada ikan yang dibudidaya setempat, atau dari tempat-tempat penjualan atau pasar ikan.

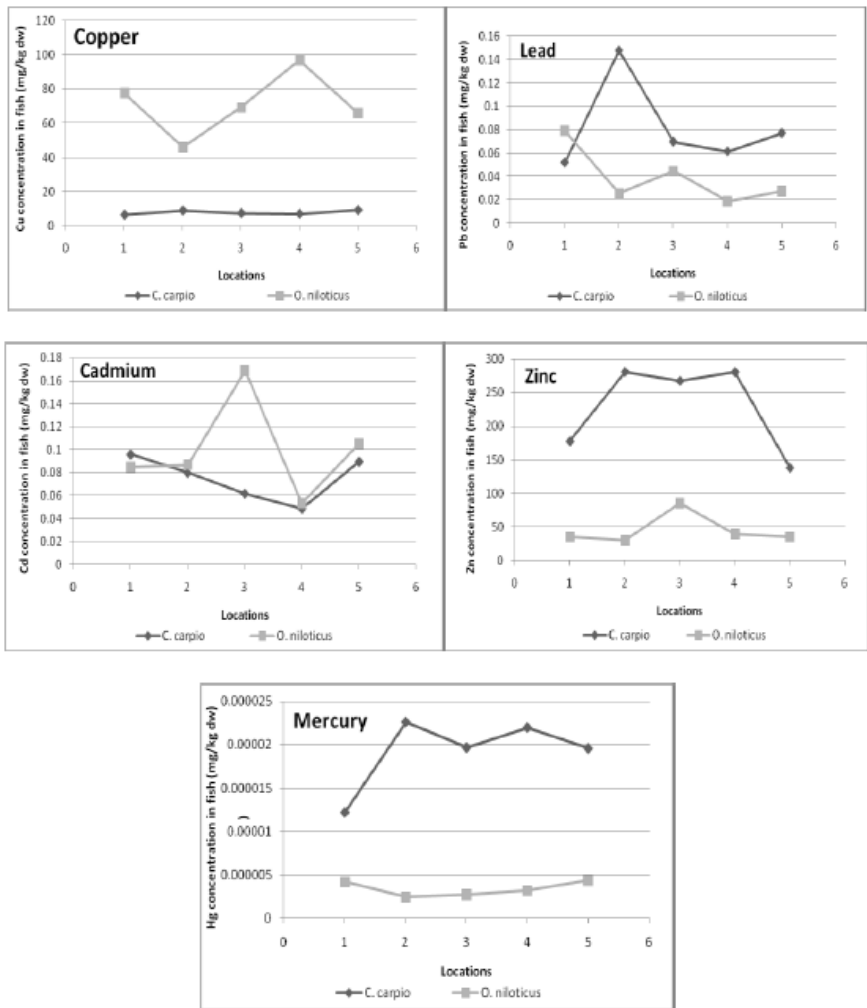
Sebagai contoh hasil penelitian yang mendapatkan adanya kandungan logam berat pada ikan yang dibudidaya dari Waduk Cirata. Kandungan logam berat pada ikan sangat tergantung dari tingkat pencemaran logam di air dan juga dari jenis spesies ikan budidaya. Kandungan pada berbagai organ pada ikan juga diketahui bervariasi, di mana organ hati mengandung paling banyak logam dibandingkan organ lainnya. Kandungan logam berat pada ikan yang lebih kecil terukur lebih tinggi daripada ikan yang lebih besar (Salami dkk., 2008).

**Tabel 3** Kandungan logam berat Cu dan Pb pada ikan mas di Waduk Cirata (Salami, dkk., 2008)

| Organ  | Cu konsentrasi (mg/kg berat kering) |                 |                                | Pb konsentrasi (mg/kg berat kering) |               |                                |
|--------|-------------------------------------|-----------------|--------------------------------|-------------------------------------|---------------|--------------------------------|
|        | Ikan Besar                          | Ikan Kecil      | Konsentrasi di hati (berlipat) | Ikan Besar                          | Ikan Kecil    | Konsentrasi di hati (berlipat) |
| Hati   | 28.778 ± 14.815                     | 33.445 ± 21.109 | 1                              | 0.253 ± 0.331                       | 0.328 ± 0.376 | 1                              |
| Insang | 4.104 ± 1.779                       | 7.500 ± 2.217   | 6–7.4                          | 0.024 ± 0.019                       | 0.072 ± 0.060 | 13.8–16.3                      |
| Otot   | 3.051 ± 0.926                       | 3.081 ± 0.927   | 6.6–11                         | 0.030 ± 0.019                       | 0.036 ± 0.033 | 7.2–12.1                       |
| Kulit  | 3.352 ± 1.120                       | 4.042 ± 1.382   | 6.2–9.7                        | 0.045 ± 0.030                       | 0.049 ± 0.061 | 5.5–7.8                        |

Dari penelitian ini juga diperoleh bahwa nilai BCF (*bioconcentration factor*) logam Cu pada ikan nila ada pada rentang angka 510-600, dan BCF logam Pb pada kisaran 300-600. Dengan jumlah konsumsi ikan di Jawa Barat 15,5 kg/orang/tahun sesuai data dari BPS, maka perkiraan *intake* logam berat Pb adalah 0,0063 mg/kg/hari, dan Cu adalah 0,338 mg/kg/hari (dengan BB 60 kg). Dari perhitungan rata-rata *intake* pada penelitian ini, dikategorikan intak Cu dan PB dari ikan masih dinyatakan tidak melebihi batas.

Tingkat konsentrai dan bioakumulasi logam berat pada ikan dipengaruhi juga oleh spesies. Hasil penelitian menunjukkan adanya perbedaan tingkat akumulasi logam berat pada ikan nila dan ikan mas yang dibudidaya di Waduk Cirata (Salami dkk., 2012).



**Gambar 11** Perbandingan kandungan logam berat pada ikan nila (*O. niloticus*) dengan ikan mas (*C. carpio*). (Salami, dkk. 2012).



## 7 KUALITITAS DAN KUANTITAS DAMPAK/EFEK

### 7.1 Terjadinya Efek Biologis

Pajanan xenobiotik terhadap manusia untuk kemudian akan masuk ke dalam tubuh dan jumlahnya dinyatakan sebagai dosis. Xenobiotik kemudian berinteraksi dalam tubuh dan mengalami perjalanan di dalam tubuh atau disebut sebagai farmakokinetika. Proses yang terjadi pada tubuh ini dimulai dengan adanya dosis masuk, kemudian mengalami absorpsi, distribusi, metabolisme, dan ekskresi (tahap toksokinetik). Proses ini dapat terjadi secara aktif maupun pasif yang melibatkan berbagai reaksi, baik Fase I atau penguraian, di mana dibuat zat yang lebih reaktif, maupun Fase II atau konjugasi dengan grup yang membuatnya menjadi hidrofilik agar mudah diekskresikan (Ariesyady dan Soemirat, 2024).

Efek biologis yang terjadi merupakan resultan akhir dari sejumlah proses yang kompleks, yaitu interaksi antara fungsi homeostatis tubuh dengan masuknya xenobiotik. Apabila usaha untuk menjaga kondisi homeostatis tidak dapat terpenuhi, atau artinya tubuh tidak dapat mengatasi toksisitas xenobiotik, maka akan terjadi efek yang bermacam-macam. Efek bisa sangat ringan, sampai efek yang parah. Efek biologis dapat berupa perubahan aktivitas enzim, perubahan fungsi organ, atau perubahan berat badan, sampai terdapat adanya gejala yang dirasakan, dan didiagnosa menderita penyakit tertentu. Efek biologis dapat terjadi pada elemen sel, pada enzim, pada RNA, DNA, dan efek pada organ. Terdapat klasifikasi xenobiotik berdasarkan organ target, seperti organ hati, sistem saraf, paru-paru, ginjal, kulit, sistem darah, sistem reproduksi, dan mata (Ariesyady dan Soemirat, 2024).

### 7.2 Pengukuran Efek dan Biomarker

Pengukuran efek juga dapat berupa hasil pengukuran perubahan yang terjadi pada sel, fungsi organ, penyakit sampai kematian. Untuk pengukuran efek yang dapat digunakan dalam penentuan batas aman suatu pajanan dan dosis yang masuk, maka semakin cepat efek atau respons dari tubuh terhadap xenobiotik ini diketahui atau dapat dideteksi, maka akan semakin baik penentuan nilai ambang batasnya.

Dalam kajian penilaian risiko, sering dilakukan pengukuran biomarker (penanda biologis), yaitu pengukuran yang merefleksikan adanya interaksi antara sistem biologis dengan paparan dari lingkungan yang dapat saja berupa paparan kimia, fisik, atau biologi. Pengukuran biomarker secara kuantitatif penting dapat dilakukan untuk mengetahui hubungan antara dosis dan respons dari xenobiotik dalam tubuh organisme. Kurva dosis dan respons ini dapat digunakan untuk memperoleh nilai ambang batas aman (RfD), atau juga nilai slope faktor untuk xenobiotik yang karsinogenik. Secara lebih lanjut, informasi yang didapat dari kurva dosis dan respons dapat digunakan pula untuk kepentingan penentuan seberapa besar remediasi sumber pencemar perlu diturunkan apabila risiko yang didapatkan melebihi penerimaan. Dengan perbaikan konsentrasi di lingkungan, maka dosis yang diterima setelah perbaikan juga akan dapat diturunkan.

Pengukuran biomarker dapat dilakukan dengan dua pendekatan, yaitu pengukuran biomarker paparan, dan pengukuran biomarker respons atau efek. Biomarker paparan adalah mengukur kehadiran xenobiotik itu sendiri atau metabolitnya dalam cairan atau jaringan tubuh (misalnya, darah, urin, ASI, rambut). Biomarker ini menunjukkan seberapa banyak xenobiotik yang telah masuk ke dalam tubuh dan pada tingkat paparan apa. Fungsinya adalah membantu mengonfirmasi paparan, mengestimasi dosis internal yang diterima tubuh, dan memprediksi efek yang mungkin terjadi. Contoh biomarker paparan, adalah dengan mengukur konsentrasi timbal dalam darah sebagai indikator paparan timbal, atau pengukuran metabolit pestisida dalam urin.

Sedangkan pengukuran biomarker efek adalah pengukuran perubahan yang terukur dan/atau teramati dalam reaksi biologis atau biokimia, meliputi perubahan perilaku hingga tingkat molekuler, biokimia, seluler, fisiologis, patologis, sebagai respons terhadap zat eksternal (xenobiotik). Tujuan pengukuran biomarker ini adalah mendeteksi efek toksik dini, memahami mekanisme toksisitas, dan memprediksi risiko kesehatan jangka panjang. *'Early biomarkers of effect'* adalah peristiwa kunci yang terjadi pada interaksi awal xenobiotik dengan target biologis. Contohnya adalah pengukuran aktivitas enzim asetilkolinesterase dalam darah sebagai biomarker efek akibat paparan pestisida organofosfat atau karbamat. Penghambatan enzim ini menunjukkan neurotoksisitas. Contoh lain pengukuran perubahan kadar hormon sebagai respons terhadap disrupsi endokrin akibat zat kimia tertentu,

atau pengukuran kerusakan DNA (misalnya, fragmentasi DNA) atau perubahan ekspresi gen terkait stres oksidatif akibat pajanan polutan.

Meskipun sangat berguna, penggunaan biomarker memiliki keterbatasan. Diperlukan pengetahuan awal tentang biomarker tersebut, dan kurangnya utilitas untuk xenobiotik dengan absorpsi rendah atau efek toksik langsung. Selain itu pengukuran biomarker yang sangat spesifik dan pada tingkat interaksi dosis-respons yang sangat dini memerlukan metode dan instrumen pengukuran yang lebih canggih untuk mendeteksi konsentrasi rendah dan terkadang masih belum tersedia dengan mudah.

Pengukuran efek lainnya yang sering dipergunakan adalah menggunakan data prevalensi dan insidensi penyakit di masyarakat. Data prevalensi penyakit dapat diperoleh dari data Dinas Kesehatan, ataupun data pengukuran langsung pada populasi di area studi. Perbandingan data prevalensi suatu penyakit, dapat digunakan juga untuk mengevaluasi permasalahan kesehatan yang ada di suatu wilayah.

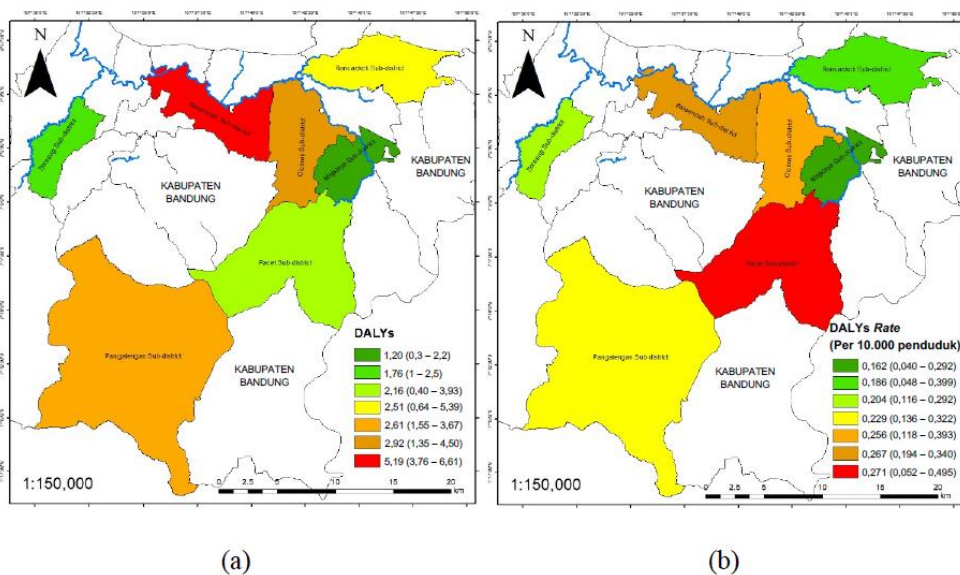
Data efek lain yang dapat digunakan untuk membandingkan tingkat status Kesehatan suatu daerah dan daerah lainnya adalah menggunakan angka kematian. Walaupun penggunaan angka mortalitas relatif mudah, namun penggunaannya untuk pertimbangan usaha pencegahan penyakit atau preventif kurang bermanfaat. Namun, sebagai metode pendekatan untuk prioritas area yang memerlukan perbaikan dibandingkan area lainnya, informasinya masih sangat relevan.

### **7.3 Pengukuran Kerugian Akibat Efek atau Penyakit**

Pengukuran efek, dapat pula didekati dengan menghitung perkiraan kerugian karena adanya kematian, penyakit atau cacat atau disabilitas, dengan perhitungan DALYs (*Disability Adjusted Life Year/DALY*). DALY adalah ukuran beban penyakit secara keseluruhan, yang merepresentasikan satu tahun hidup yang hilang karena masalah kesehatan, disabilitas, atau kematian dini. Konsep DALY dikembangkan pada tahun 1990-an oleh Harvard University atas permintaan Bank Dunia sebagai cara untuk membandingkan kesehatan dan harapan hidup antar negara. Satu DALY setara dengan satu tahun kehidupan sehat yang hilang. DALY digunakan secara luas dalam kesehatan masyarakat untuk mengukur dampak berbagai kondisi kesehatan pada populasi,

mengintegrasikan data morbiditas (disabilitas) dan mortalitas (kematian) ke dalam satu angka komprehensif.

Berikut ditampilkan contoh perhitungan beban penyakit yang terjadi akibat pajanan arsenik pada air yang dikonsumsi penduduk di 7 kecamatan di Kabupaten Bandung. Total DALYs dan DALYs rate yang diperoleh adalah 18,36 tahun (8,38 – 28,79 tahun) dan 0,23 per 10.000 orang (0,10 – 0,36 per 10.000 orang). DALYs rate penelitian ini adalah 0,23 per 10.000 orang setara dengan 2,3 per 100.000 orang, dan setara dengan  $2,3 \times 10^{-5}$  per orang – tahun, yaitu 23,02 kali lebih besar dari tingkat risiko referensi yang ditentukan oleh WHO ( $1 \times 10^{-6}$  DALY per orang - tahun). Penggambaran nilai DALYs dalam peta spasial dapat menunjukkan informasi yang lebih jelas, sehingga upaya pengendalian dan perbaikan kesehatan masyarakat dapat diprioritaskan untuk daerah dengan beban penyakit atau kerugian DALYs lebih besar (Fahimah, 2024).



**Gambar 12** Distribusi spasial beban penyakit kanker kulit akibat pajanan arsenik melalui penggunaan air menurut kecamatan di Kabupaten Bandung, 2021: (a) DALYs, dan (b) DALYs rate. (Fahimah, 2024)

Pemilihan jenis pengukuran efek apakah menggunakan biomarker atau penyakit, atau kerugian yang terjadi sangat tergantung dari konteks keperluannya. Untuk aplikasi preventif dan penilaian ambang batas, maka pengukuran biomarker akan lebih bermanfaat. Namun, untuk aplikasi praktis

dalam pengelolaan lingkungan secara lebih luas, penilaian kerugian dapat lebih merepresentasikan status kondisi suatu daerah dengan lebih baik. Untuk karakterisasi risiko kesehatan, maka biomarker akan secara ilmiah dapat memberikan informasi efek atau respons yang lebih dini dari pajanan xenobiotik. Sedangkan untuk keperluan manajemen risiko dan prioritas tindakan lanjut, mungkin penilaian kerugian lebih sesuai untuk dipergunakan.

## 7.4 Pengukuran Efek pada Lingkungan Nonmanusia

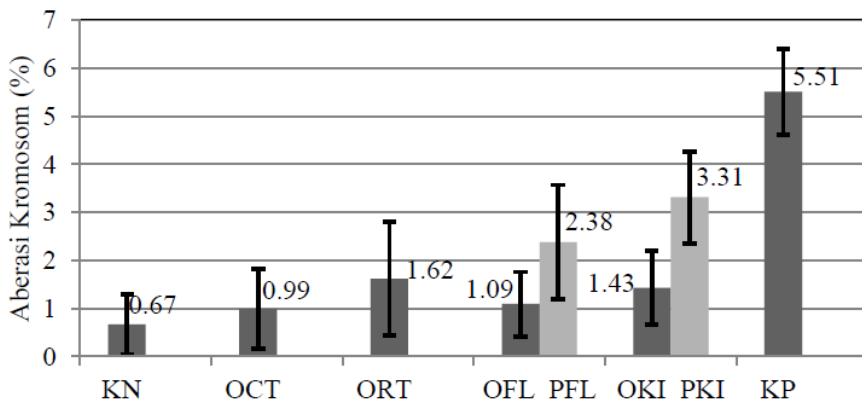
Efek pajanan xenobiotik dapat terjadi juga pada organisme selain manusia. Selain perhitungan penilaian risiko ekologis atau lingkungan, maka efek pajanan xenobiotik pada organisme juga dapat beragam. Mulai dari adanya akumulasi xenobiotik yang belum menunjukkan adanya gangguan fungsi dan morfologis sampai hilangnya populasi dan mengubah ekosistem. Perubahan ekosistem pada lingkungan, khususnya ekologi umum diperlihatkan dengan adanya penurunan biodiversitas. Hal ini tentu saja efek sudah mengakibatkan berkurangnya jumlah spesies, atau bahkan hilangnya beberapa jenis spesies tertentu.

Penelitian yang dilakukan di perairan penerima limbah industri tekstil di Sungai Cikakembang di Kabupaten Bandung, dengan tujuan untuk melihat efek ekotoksikologi dari limbah efluen tekstil. Hal ini dilakukan dengan mengukur LC50 pada *D. magna*, IC50 pada inhibisi pertumbuhan akar *A. cepa*, serta adanya aberasi kromosom pada *A. cepa*. Tiga sampel efluen tekstil dan dua sampel air sungai (diambil sebelum dan sesudah pembuangan efluen) dikumpulkan tiga kali dari Sungai Cikakembang sebagai salah satu anak sungai Sungai Citarum. Hasil penelitian menunjukkan semua efluen dianggap toksik, dengan nilai LC50 berkisar antara 15,64-68,48%. Sedangkan nilai IC50 pada inhibisi pertumbuhan akar *A. cepa* berkisar 33,3-109,5%. Aberasi kromosom terdeteksi sekitar 19,25-54,55% dibandingkan dengan 8,88% pada kontrol. Terjadi juga peningkatan inhibisi pertumbuhan akar pada air sungai setelah menerima efluen tekstil. Oleh karena itu, efluen tekstil harus dibuang dengan kualitas yang lebih aman untuk melindungi ekosistem akuatik (Salami, dkk., 2014).

Penelitian lain dilakukan di Rumah Sakit, untuk melihat efek pajanan radioaktif di beberapa unit di rumah sakit menggunakan adanya perubahan kromosom pada *A. cepa*. Aberasi kromosom pada *A. cepa* diuji di ruangan di

mana operator berada, dan ruangan pemeriksaan/tindakan. Diperoleh hasil bahwa di ruangan operator CT-Scan, ruang operator radioterapi, ruang operator fluoroskopi, ruang operator kardiologi intervensi, aberasi kromosom yang terjadi telah melebihi dari aberasi kromosom pada kondisi kontrol (tanpa radiasi). Sedangkan pada ruang pemeriksaan fluoroskopi dan ruang pemeriksaan kardiologi intervensi, prosentasi aberasi kromosom yang terjadi jauh lebih besar (Gambar 13) (Sopandi dan Salami, 2013).

Laju dosis radiasi di ruang pemeriksaan memang jauh lebih besar, yaitu di ruang fluoroskopi sebesar  $121,6 \pm 127,7 \mu\text{S}/\text{jam}$ ; ruang pemeriksaan Kardiologi Intervensi adalah  $165,59 \pm 120,6 \mu\text{S}/\text{jam}$ . Sementara di ruang operator tertinggi laju dosisnya adalah  $1,134 \pm 0,719 \mu\text{S}/\text{jam}$ ; di ruang operator CT-Scan, dan ruang operator lainnya laju dosis adalah  $< 0,14 \mu\text{S}/\text{jam}$  (Sopandi dan Salami, 2013).

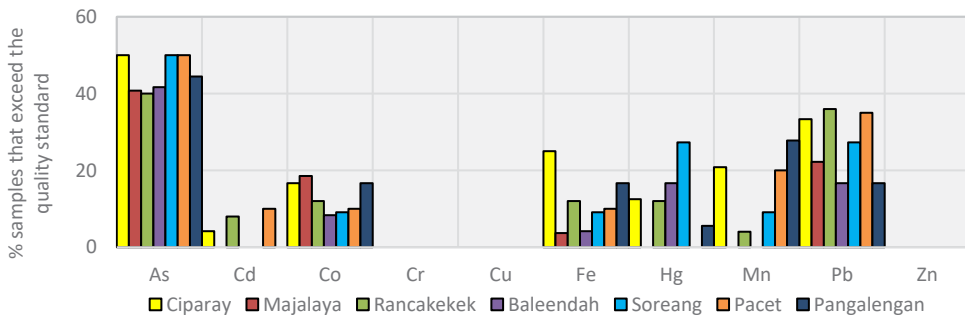


**Gambar 13** Perbandingan Nilai Aberasi Kromosom (Rerata  $\pm$  SD(%)) Antar Ruangan pada Semua Lokasi Studi (Ket.: Kontrol Negatif (KN); Ruang Operator Fluoroskopi (OFL); Ruang Operator SC-Scan (OCT); Ruang Operator Kardiografi Intervensi (OKI), Ruang Operator Radioterapi (ORT); Ruang Pemeriksaan Fluoroskopi (RFL); Ruang Pemeriksanan Kardiologi Intervensi (PKI\_d an Kontrol Positif (KP)

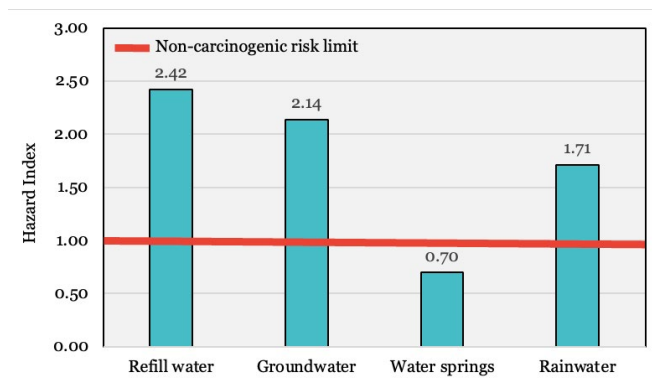
## 8 PENILAIAN RISIKO KESEHATAN DAN LINGKUNGAN

### 8.1 Penilaian Risiko Kesehatan dari Paparan Air

Penilaian risiko Kesehatan paparan terhadap xenobiotik dihitung berupa risiko karsinogenik dan non-karsinogenik. Penelitian paparan logam berat dari penggunaan air minum dan untuk kebutuhan sanitasi dan *hygiene* telah dilakukan di 7 kecamatan di Kabupaten Bandung. Kadar arsenik, kadmium, kobalt, besi, merkuri, mangan, dan timbal ditemukan melebihi baku mutu air minum (Gambar 14) (Fahimah, dkk., 2023). Hasil perhitungan risiko kesehatan nonkarsinogenik mendapatkan perbedaan risiko dengan perbedaan jenis air yang dikonsumsi (Gambar 15). Nilai risiko kesehatan nonkarsinogenik, HI menunjukkan nilai yang telah melebihi 1 (Fahimah, dkk., 2024). Diperoleh juga jenis sumber air isi ulang memberikan kontribusi nilai HI yang lebih tinggi dari pada sumber air lainnya (Fahimah, dkk., 2024).



**Gambar 14** Persentase jumlah sampel yang memiliki konsentrasi logam berat melebihi baku mutu air untuk konsumsi di 7 kecamatan



**Gambar 15** Hasil penilaian rata-rata HI pada jalur ingesti berdasarkan jenis air yang dikonsumsi

## 8.2 Perhitungan Risiko Kesehatan dengan Analisis Probabilistik

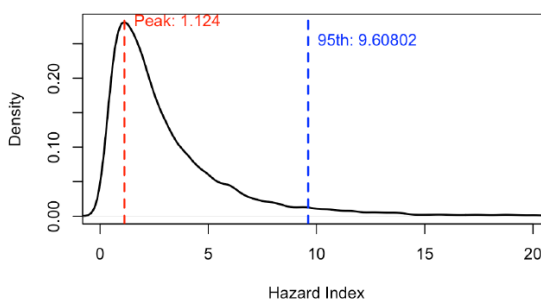
Hasil perhitungan risiko Kesehatan mempunyai keterbatasan dengan adanya ketidakpastian yang dapat berasal dari pengambilan data pengukuran, perhitungan pajanan, asumsi-asumsi yang digunakan, dll. Oleh karena itu, faktor ketidakpastian ini dapat dikurangi dengan melakukan pendekatan probabilistik, yang mengolah secara lebih lanjut untuk mendapatkan frekuensi distribusinya. Prinsip perhitungan probabilistik ini adalah menyeleksi input data suatu parameter secara random dan dilakukan perhitungan berulang untuk menghasilkan distribusi frekuensi dari output, baik untuk data pajanan atau *risk* (enHEALTH, 2012). Pengolahan data berulang dilakukan mengguna Simulasi Monte Carlo. Distribusi frekuensi yang dihasilkan akan menunjukkan distribusi frekuensi yang lebih menggambarkan nilai risiko atau nilai pajanan (tergantung yang disimulasi) dari populasi di daerah tersebut.

Hasil perhitungan risiko Kesehatan di 9 kecamatan di area Kabupaten Bandung, dari adanya pajanan logam berat dalam air yang dikonsumsi dan dipergunakan untuk mandi, diperoleh nilai seperti pada Tabel 4. Pajanan logam berat secara oral menunjukkan risiko kesehatan nonkarsinogenik yang lebih tinggi daripada pajanan dermal. Total HI yang diperoleh dari 8 jenis logam berat yang diukur (As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Pb, dan Zn) mendapatkan Total HI > 1 untuk semua kecamatan. HI Total tertinggi ditemukan di Kecamatan Baleendah, dengan catatan bahwa perhitungan HI yang dilakukan menggunakan data pajanan *default*/baku.

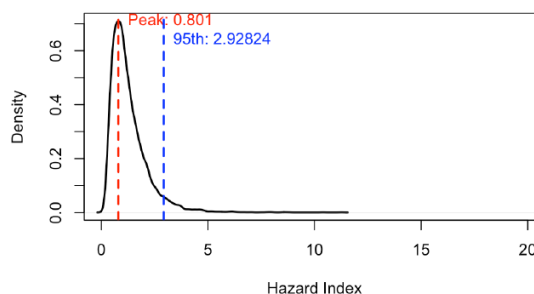
Sedangkan untuk analisis statistik probabilistik menggunakan simulasi Monte Carlo, mendapatkan adanya perbedaan frekuensi distribusi nilai HI di berbagai kecamatan. Sebagai contoh diperlihatkan perbedaan distribusi nilai HI untuk Kecamatan Baleendah (yang merupakan nilai HI tertinggi) dan Margaasih (yang menunjukkan nilai HI terendah). Dari Gambar 15 dan 16 dapat terlihat bahwa distribusi nilai HI di Kecamatan Margaasih nilai peaknya lebih rendah, namun dari 95% nilai HI lebih bergeser ke arah kiri. Sementara di Kecamatan Baleendah menunjukkan rentang distribusi HI lebih melebar. Terlihat bahwa nilai risiko di kedua tempat tersebut berbeda pola distribusinya (Aretha, K, 2025).

**Tabel 4** Nilai risiko kesehatan nonkarsinogenik (HI) dari oral dan dermal di 9 kecamatan

| Sub-district | Oral HI  | Dermal HI | Total HI |
|--------------|----------|-----------|----------|
| Ciparay      | 2.832087 | 0.000060  | 2.832147 |
| Dayeuhkolot  | 1.825175 | 0.000043  | 1.825218 |
| Margasih     | 1.371534 | 0.000097  | 1.371631 |
| Baleendah    | 3.811369 | 0.000026  | 3.811395 |
| Majalaya     | 1.826503 | 0.000023  | 1.826526 |
| Pacet        | 2.066769 | 0.000023  | 2.066793 |
| Pangalengan  | 2.890546 | 0.000026  | 2.890572 |
| Rancaekek    | 2.551849 | 0.000031  | 2.551879 |
| Soreang      | 2.398028 | 0.000020  | 2.398048 |



**Gambar 16** Distribusi nilai HI di Kecamatan Baleendah



**Gambar 17** Distribusi nilai HI di Kecamatan Margasih

### 8.3. Pengaruh Jarak Sumber Air Tanah dengan Sungai Citarum

Penelitian risiko kesehatan dari paparan logam berat pada air tanah dangkal dilakukan juga untuk melihat potensi pengaruh air Sungai Citarum yang tercemar dengan kualitas air tanah dangkal di sekitar lokasi sungai. Sebanyak 51 sampel air tanah yang terletak <150 m dari sungai dikumpulkan dari daerah pertanian, industri, dan domestik di beberapa segmen Sungai Citarum Hulu. Paparan yang dipertimbangkan melalui pajanan secara oral dan dermal.

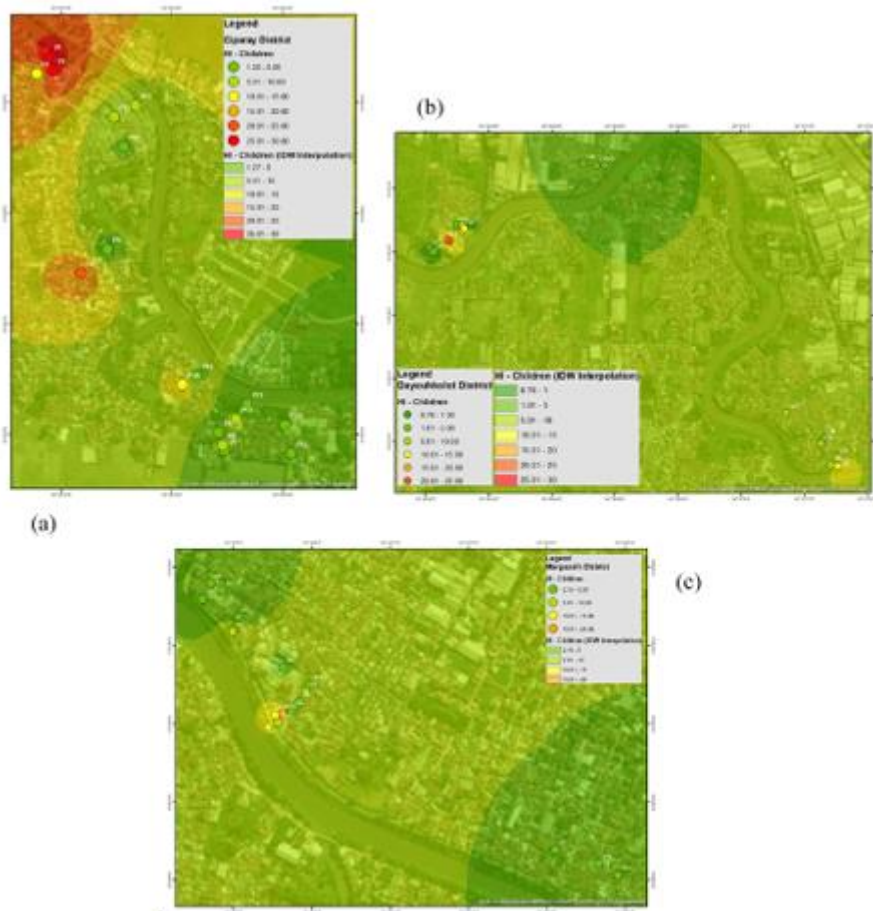
Konsentrasi Pb secara statistik berkorelasi terbalik dengan jarak dari sungai, semakin jauh dari sungai, konsentrasi Pb semakin rendah. Risiko nonkarsinogenik pada anak-anak didapatkan lebih tinggi daripada pada orang dewasa, dengan urutan pertanian > industri > domestik, dan air tanah hanya cocok untuk paparan dermal. Distribusi spasial dari nilai HI pada anak-anak dapat dilihat pada Gambar 18.

Sementara itu, risiko karsinogenik (ECR) yang didapatkan di semua area untuk dewasa dan anak-anak, menunjukkan nilai > 10<sup>-4</sup>. Hal ini artinya risiko tidak dapat diterima untuk kedua pajanan dermal dan oral, dengan urutan risiko di pertanian > industri > domestik (Tabel 5).

Secara umum, jarak yang lebih jauh dari sungai menunjukkan penurunan nilai risiko. Melalui perhitungan hubungan jarak dengan nilai HI, didapatkan perkiraan jarak aman lokasi sumber air dari sungai. Perhitungan mendapatkan jarak aman mengikuti urutan industri > pertanian > daerah domestik, atau diartikan jarak minimum untuk mendapatkan nilai HI ≤ 1 (maksimum risiko dapat diterima) di area industri lebih besar daripada jarak aman untuk area pertanian dan domestik. Perkiraan jarak aman pada penggunaan air tanah dekat sungai ini, diperkirakan dipengaruhi juga oleh kondisi hidrogeologi dan kerawanan banjir di daerah industri yang distudi (Salami, dkk., 2025).

**Tabel 5** Nilai Risiko ECR pada dewasa dan anak untuk daerah industri, pertanian, dan permukiman

| Element                  | ECR Adult       |                 | ECR Children    |                 |
|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|                          | Mean            | SD              | Mean            | SD              |
| <b>Agricultural area</b> |                 |                 |                 |                 |
| As                       | 1.30E-04        | 2.94E-04        | 4.77E-05        | 1.08E-04        |
| Cd                       | 6.28E-04        | 1.95E-03        | 2.30E-04        | 7.16E-04        |
| Cr(VI)                   | 3.57E-04        | 5.58E-04        | 1.31E-04        | 2.05E-04        |
| Pb                       | 5.30E-06        | 4.16E-06        | 1.95E-06        | 1.52E-06        |
| <b>ΣECR</b>              | <b>1.12E-03</b> | <b>2.08E-03</b> | <b>4.11E-04</b> | <b>7.63E-04</b> |
| <b>Industrial area</b>   |                 |                 |                 |                 |
| As                       | 1.92E-04        | 3.91E-04        | 7.03E-05        | 1.43E-04        |
| Cd                       | 2.65E-04        | 4.07E-04        | 9.71E-05        | 1.49E-04        |
| Cr(VI)                   | 1.53E-04        | 5.81E-05        | 5.59E-05        | 2.13E-05        |
| Pb                       | 3.59E-06        | 3.95E-06        | 1.32E-06        | 1.45E-06        |
| <b>ΣECR</b>              | <b>6.13E-04</b> | <b>7.35E-04</b> | <b>2.25E-04</b> | <b>2.70E-04</b> |
| <b>Domestic area</b>     |                 |                 |                 |                 |
| As                       | 6.57E-05        | 2.46E-04        | 2.41E-05        | 9.00E-05        |
| Cd                       | 1.96E-04        | 3.01E-04        | 7.18E-05        | 1.10E-04        |
| Cr(VI)                   | 1.97E-04        | 1.12E-04        | 7.21E-05        | 4.45E-05        |
| Pb                       | 5.12E-06        | 3.91E-06        | 1.88E-06        | 1.43E-06        |
| <b>ΣECR</b>              | <b>4.63E-04</b> | <b>3.80E-04</b> | <b>1.70E-04</b> | <b>1.39E-04</b> |



**Gambar 18** Distribusi Spasial nilai HI untuk Anak-anak (a) Ciparay – Pertanian; (b) Dayeuhkolot – industri; (c) Margaasih – permukiman.

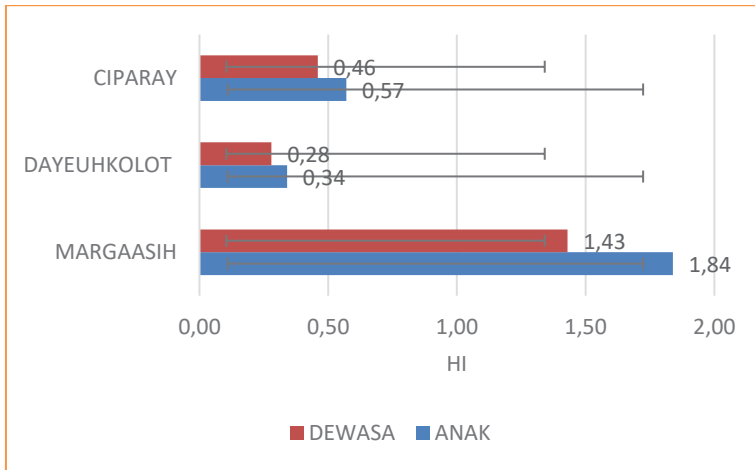
### 8.4. Prioritisasi Pestisida di Lingkungan Citarum Hulu

Metode *screening* yang berbeda, dikembangkan untuk memprioritaskan risiko kesehatan akuatik dan manusia dari pestisida berdasarkan data penggunaan, pemodelan limpasan, dan prediksi efek. Aset penting dari metode baru ini adalah bahwa ia tidak memerlukan data konsentrasi yang diukur, yang sering kali tidak tersedia atau sulit diperoleh di negara berpenghasilan rendah dan menengah seperti Indonesia. Metode ini diterapkan untuk memprioritaskan 31 pestisida pertanian yang digunakan di Daerah Aliran Sungai Citarum Hulu di Jawa Barat, Indonesia. Peringkat pestisida berdasarkan konsentrasi yang diprediksi secara umum menunjukkan kesesuaian yang baik dengan peringkat berdasarkan konsentrasi yang diukur melalui pengambilan *passive*

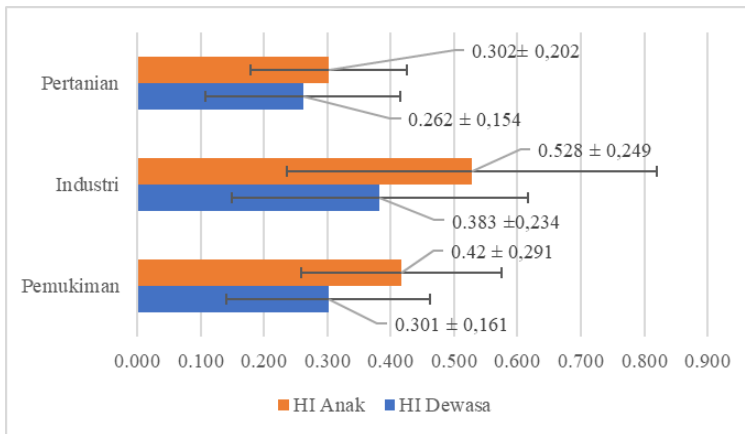
*sampler*. Intake pestisida individual melalui konsumsi air sungai diprediksi menyebabkan risiko kesehatan manusia yang dapat diabaikan, tetapi risiko akuatik yang substansial (yaitu PEC/PNEC  $\geq 1$ ) diprediksi untuk profenofos ( $5,2 \times 10^1$ ), propineb ( $3,6 \times 10^1$ ), chlorpyrifos ( $2,6 \times 10^1$ ), carbofuran ( $1,7 \times 10^1$ ), imidacloprid ( $9,4 \times 10^0$ ), methomyl ( $7,6 \times 10^0$ ), dan chlorantraniliprole ( $3,6 \times 10^0$ ). Oleh karena itu, pengelolaan air disarankan untuk mengurangi penggunaan dan limpasan pestisida daerah Citarum Hulu (Utami, dkk., 2020c)

## 8.5. Penilaian Risiko Kesehatan dari Paparan Udara

Selain adanya paparan dari lingkungan air, paparan dari lingkungan udara di daerah pertanian (Ciparay), industri (Dayeuhkolot), dan permukiman (Margaasih) ditemukan kondisi yang berbeda pula. Pencemaran  $PM_{2,5}$  di area permukiman ternyata mengandung konsentrasi logam yang lebih tinggi dan beragam, dan diperoleh perbandingan nilai HI seperti tampak pada Gambar 18. Secara total nilai HI adalah  $0,28 \pm 0,28$  untuk dewasa, dan HI total  $0,34 \pm 0,17$  untuk anak-anak. Nilai HI total  $< 1$  sehingga dianggap tidak memberi risiko. Namun, paparan dari logam Cr ditemukan memberikan kontribusi nilai HQ yang paling tinggi. Untuk nilai risiko karsinogen, didapatkan perkiraan Total ECR pada dewasa adalah  $4,54 \cdot 10^{-5}$ , sedangkan pada anak-anak adalah  $2,14 \cdot 10^{-4}$ . Risiko karsinogenik yang diperoleh tergolong perlu diwaspadai karena pada anak sudah mencapai lebih dari  $10^{-4}$ . Logam Cr ditemukan merupakan kontributor utama dari nilai risiko karsinogenik (Herwiandani, 2024). Sedangkan hasil pengukuran pencemar udara lain menggunakan AQMS, seperti  $PM_{2,5}$ ,  $SO_2$ ,  $NO_2$ , CO, dan  $O_3$  dari Lokasi yang sama menunjukkan perbandingan nilai HI yang berbeda. Pada Gambar 19 terlihat daerah industri mempunyai nilai HI yang paling tinggi dibanding dua area lainnya (Pratiwi, 2025).



**Gambar 19** Nilai HI dari pajanan logam berat dari PM<sub>2,5</sub> di area pertanian, industri, dan permukiman (Herwiandani, 2024)



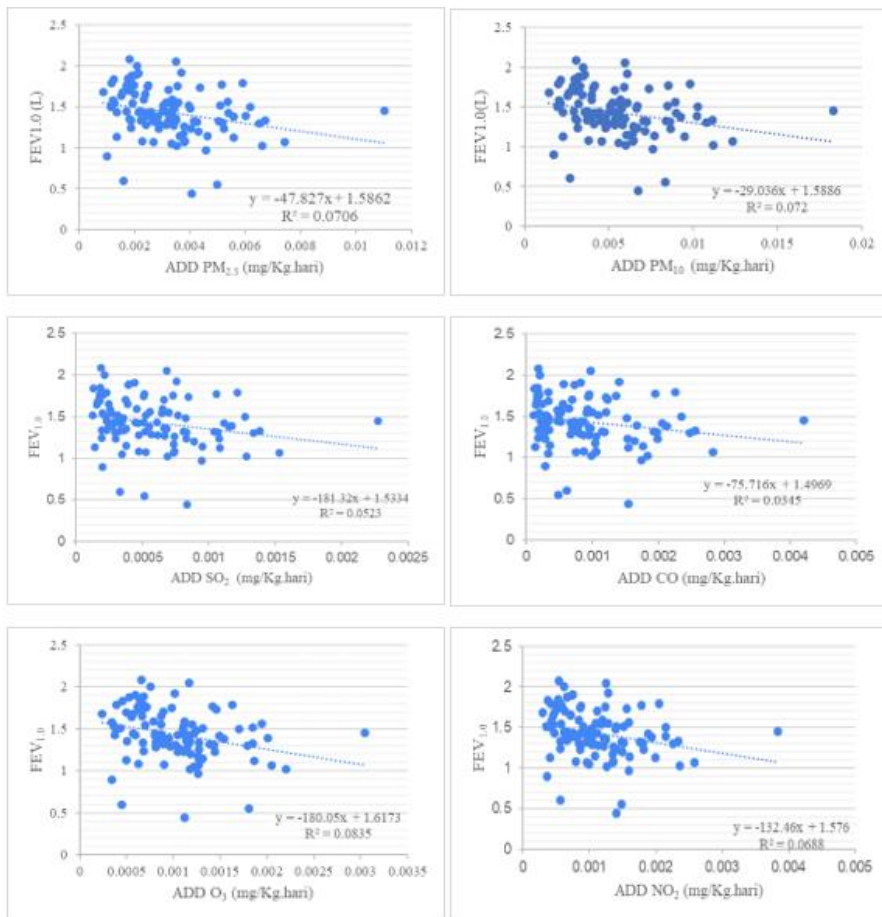
**Gambar 20** Nilai HI dari pajanan PM<sub>2,5</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, dan Ozon, di area pertanian, industri, dan permukiman (Pratiwi, 2024)

## 8.6. Dampak Kesehatan pada Masyarakat

Penelitian terhadap dampak kualitas lingkungan dengan terjadinya penyakit dilakukan dengan menilai adanya gangguan fungsi paru-paru pada anak-anak di beberapa area. Kapasitas fungsi paru-paru yang dilihat adalah dengan pengukuran besarnya nilai FEV<sub>1.0</sub> dan FVC, serta jenis gangguan paru restriktif atau obstruktif. Penelitian Pratiwi (2025), mendapatkan bahwa anak yang tinggal di daerah industri mempunyai risiko mendapat gangguan paru-paru OR = 4,5 (CI 95% 1,659-12,66) kali lebih besar daripada anak-anak yang tinggal di area permukiman, dan OR = 8,86 (CI 95% 2,87-27,31) kali daripada

anak-anak yang tinggal di daerah pertanian. Jenis gangguan penyakit paru-paru restriktif ditemukan pada 17 anak (dari 35), dan anak dengan kondisi paru-paru normal sebanyak 12 anak. Gangguan obstruktif dideteksi pada 5 anak, sedangkan 1 anak mengalami gangguan paru-paru kombinasi.

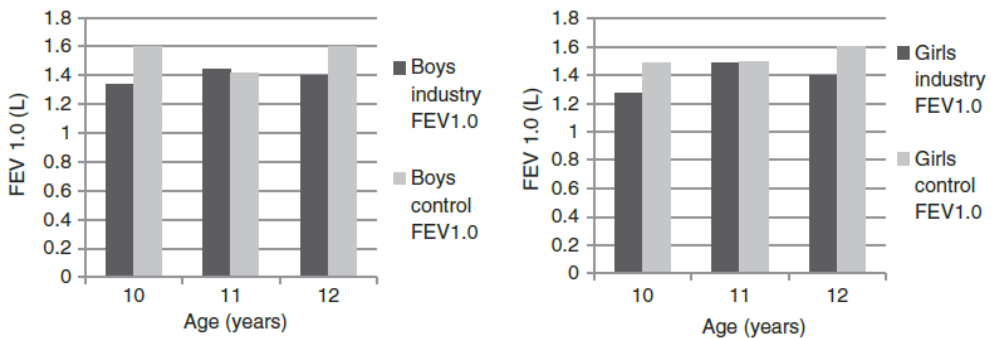
Ditemukan pula hubungan *intake* pajanan untuk semua pencemar udara (PM<sub>2,5</sub>, PM<sub>10</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, CO, dan O<sub>3</sub>) dengan fungsi paru-paru (FVE1.0). Semakin tinggi pencemaran udara, semakin menurun nilai FEV1.0 pada anak-anak yang distudi di area pertanian, industri, dan permukiman (Pratiwi, 2025).



**Gambar 21** Hubungan *intake* pencemar dengan penurunan fungsi paru FEV1,0

Penelitian serupa dengan pengukuran FEV1.0, dilakukan pula di area industri di Parung Panjang, Jawa Barat dan daerah transportasi batu bara di Tapin, Kalimantan Selatan (Gambar 22). Hasil menunjukkan adanya pajanan

PM<sub>2,5</sub> di area industri 3 lebih besar, dan Kesehatan paru-paru anak juga sudah mengalami penurunan dibandingkan di area bukan industri. Analisis lebih lanjut terhadap fungsi paru-paru anak menunjukkan bahwa lebih dari 68% anak usia sekolah di daerah transportasi batubara mengalami penurunan fungsi paru dengan *intake* ADI (*Average Daily Intake*) atau asupan rata-rata  $25,45 \pm 10,55 \mu\text{g/kg/hari}$  dibandingkan ADI pada kelompok kontrol dengan asupan rata-rata  $8,53 \pm 3,19 \mu\text{g/kg/hari}$ . Meskipun secara statistik tidak ada perbedaan signifikan dalam kapasitas paru di daerah industri dan kontrol, namun terdapat kecenderungan bahwa perkembangan kapasitas paru pada kelompok kontrol lebih baik daripada kelompok industri. Demikian pula, pengukuran rata-rata partikulat respirabel di daerah peleburan daur ulang baterai bekas (di Parung Panjang) rata-rata  $225,9 \pm 214,9 \mu\text{g/m}^3$ , sedangkan di daerah kontrol  $75,11 \pm 39,7 \mu\text{g/m}^3$ . Bagi anak perempuan, risiko mengalami penyakit paru ringan ditemukan 1,3 kali lebih besar daripada anak perempuan di kelompok kontrol, sedangkan pada anak laki-laki risikonya 1,9 kali lebih besar daripada anak laki-laki di daerah kontrol (Salami, dkk., 2014).



**Gambar 22** Perbandingan nilai kapasitas paru-paru pada anak di daerah industri dan bukan industri (Salami, dkk., 2014)

Penelitian lain yang melihat efek dari kondisi lingkungan kerja sudah banyak pula dilakukan, baik dari pajanan fisika, maupun bahan kimia, ataupun dari stres ergonomi terhadap kelelahan dan lain-lain.



## 9 TANTANGAN PENILAIAN RISIKO UNTUK PENGELOLAAN LINGKUNGAN BERKELANJUTAN

Hasil risiko kesehatan atau lingkungan dapat menjadi masukan dalam manajemen risiko, serta alternatif dalam pengelolaan lingkungan. Dari penelitian yang dilakukan, diperoleh informasi dan pemetaan risiko Kesehatan yang terjadi dari paparan xenobiotik. Pemetaan risiko dapat menunjukkan dan membandingkan area dengan kondisi kerentanan yang dapat digunakan dalam penentuan prioritas dan pengambilan keputusan. *Overlaying* nilai risiko kesehatan bersama-sama faktor-faktor yang berpengaruh dalam pencapaian target Pembangunan berkelanjutan dapat menjadi potensi *data-driven policy* bagi pemerintah daerah. Faktor-faktor seperti perubahan tata guna lahan, tingkat status lingkungan, kondisi sosial ekonomi, dan lain-lain dapat memberikan sumber informasi yang lebih komprehensif dalam menilai kebutuhan pengelolaan lingkungan.

Tantangan dalam penilaian dan analisis risiko lingkungan banyak dipengaruhi oleh kemampuan dalam:

- Mengidentifikasi bahaya dan xenobiotik yang ada di lingkungan. Dengan banyaknya *emerging pollutants*, maka memerlukan metode pengukuran yang lebih handal, di samping juga mampu dalam mengukur konsentrasi rendah yang umumnya menjadi sumber paparan jangka panjang bagi kesehatan dan kesejahteraan manusia.
- Mengidentifikasi respons atau efek dini pada organisme dan manusia sehingga dapat menentukan nilai-nilai paparan yang aman secara lebih awal. Bidang toksikologi dan epidemiologi lingkungan menjadi ujung tombak dalam penentuan efek dini.
- Mengintegrasikan penilaian risiko kesehatan dan faktor-faktor yang memengaruhi kesejahteraan dan Pembangunan secara lebih holistik dalam pengambilan keputusan, memerlukan pengolahan data yang lebih mendalam, karena interaksi antara faktor tersebut cukup kompleks dengan variabilitas kondisi daerah, masyarakat serta lingkungan yang beragam.

Untuk itu, kerja sama dan kolaborasi dengan bidang keilmuan lain seperti kimia, biokimia, matematika, data analitik, instrumentasi serta spasial dan temporal menjadi suatu keharusan di masa depan.



## 10 Penutup

Pembahasan mengenai penilaian risiko kesehatan lingkungan telah mengantarkan kita pada pemahaman bahwa hasil-hasil analisis ini bukan sekadar angka atau laporan penelitian semata. Lebih dari itu, informasi risiko kesehatan dan lingkungan memiliki peran fundamental sebagai masukan strategis dalam proses manajemen risiko serta perumusan alternatif pengelolaan lingkungan. Sebagaimana telah diuraikan, pemetaan risiko yang komprehensif, seperti yang ditunjukkan oleh nilai HI di berbagai kecamatan atau tingkat risiko karsinogenik pada populasi tertentu, memungkinkan identifikasi area-area yang rentan. Data ini menjadi pondasi untuk penentuan prioritas dan pengambilan keputusan yang berbasis bukti, terutama ketika diintegrasikan dengan faktor-faktor penentu pembangunan berkelanjutan lainnya seperti tata guna lahan, status lingkungan, dan kondisi sosial ekonomi masyarakat.

Namun, perlu disadari bahwa perjalanan menuju pengelolaan lingkungan yang benar-benar berkelanjutan masih diwarnai oleh berbagai tantangan signifikan. Identifikasi bahaya dan xenobiotik, khususnya fenomena *emerging pollutants* yang terus berkembang, menuntut inovasi dalam metode pengukuran yang lebih akurat dan sensitif. Deteksi respons atau efek dini pada organisme dan manusia juga menjadi kunci untuk menetapkan nilai ambang batas pajanan yang aman secara proaktif.

Pada akhirnya, tantangan terbesar terletak pada kemampuan kita untuk mengintegrasikan penilaian risiko kesehatan dengan faktor-faktor kesejahteraan dan pembangunan secara holistik dalam proses pengambilan keputusan. Interaksi yang kompleks antar berbagai faktor ini, ditambah dengan variabilitas kondisi daerah, masyarakat, dan lingkungan, memerlukan pendekatan multidisiplin yang kuat. Kolaborasi lintas ilmu, mulai dari kimia, biokimia, matematika, analisis data, hingga instrumentasi, serta perspektif spasial dan temporal, bukan lagi pilihan, melainkan sebuah keniscayaan. Hanya dengan sinergi inilah, hasil penilaian risiko dapat benar-benar dioptimalkan untuk memandu kebijakan dan tindakan nyata yang berujung pada pengelolaan lingkungan yang efektif dan mendukung keberlanjutan hidup kita semua.

Semoga buku sederhana ini dapat memberi gambaran tentang penilaian risiko kesehatan dan lingkungan, serta memberi pemahaman yang baik mengenai pengelolaan lingkungan. Harapannya, keterlibatan semua orang dan pihak memang merupakan suatu keharusan sehingga pembangunan berkelanjutan dapat diwujudkan.

## 11 UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kami panjatkan kehadirat Allah Swt. atas segala karunia dan kasih sayang-Nya. Penulis mengucapkan terimakasih yang tak terhingga kepada semua pihak yang telah mendukung, mendoakan, menyemangati, dan berkontribusi terhadap pencapaian penulis dalam melaksanakan tugas-tugas Tri Dharma Perguruan Tinggi sebagai pendidik, peneliti dan pengabdian kepada masyarakat, sehingga saat ini dapat meraih jabatan Guru Besar. Terima kasih kami haturkan kepada:

- Rektor Institut Teknologi Bandung
- Ketua, Sekretaris dan Anggota Senat Akademik Institut Teknologi Bandung
- Ketua, Sekretaris dan Anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung
- Dekanat Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
- Ketua, Sekretaris dan Anggota Senat, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
- Prof. Em. dr. Juli Soemirat, MPH, Ph.D., sebagai panutan, pembimbing dan pengarah sejak Penulis menjadi mahasiswa, dan kemudian atas ajakan beliau Penulis bergabung di Departemen Teknik Lingkungan ITB. Terima kasih untuk seluruh bimbingan, nasihat, peluang dan tantangan yang telah diberikan kepada Penulis sampai saat ini.
- Prof. Dr. Ir. Suprihanto Notodarmojo yang selalu mendukung dan mendorong untuk terus berkembang.
- Prof. Prof. Ir. Mindriany Syafila, M.S., Ph.D. atas dukungan dan pengingatnya untuk semua proses penyelesaiannya.
- Prof. Dr. Ir. Dwina Roosmini, MS., sebagai sahabat dan *partner*, sejak awal bergabung di Teknik Lingkungan, mengembangkan bidang kesehatan dan keselamatan, dan selalu sabar menerima keluh kesah.
- Prof. Ir. Agus Jatnika, Ph.D atas dukungan, dorongan, dan doanya. Terima kasih atas segala kebersamaan sebagai mitra tempat bertanya mulai saat bersama menjadi Kaprodi.
- Prof. Ir. Joni Hermana, M.Sc.ES, Ph.D. (ITS), Prof. Ir. Ade Sjafruddin, M.Sc., Ph.D. (FTSL), Prof. Dr. Tati Suryati Syamsudin, M.S., DEA. (SITH) yang sudah berkenan memberi dukungan dan rekomendasi.

- Seluruh kolega senior dan junior di Kelompok Keahlian Teknologi Pengelolaan Lingkungan FTSL ITB yang selalu menjadi mitra menyenangkan dalam kegiatan pengembangan KK Teknologi Pengelolaan Lingkungan.
- Keluarga Besar Laboratorium Higiene Industri, Keluarga Besar Teknik Lingkungan Raya, dan Keluarga Besar Pusat Studi Lingkungan Hidup – ITB.
- Seluruh mahasiswa bimbingan S-1, S-2 dan S-3 Program Studi Teknik Lingkungan FTSL - ITB, yang sudah bekerja keras dalam pelaksanaan penelitian-penelitian, dan berkontribusi dalam pengembangan diri dan keilmuan.
- Kedua orang tua tercinta: Alm. Ibu Siti Maryati Endang Sumarsih, Alm. Bapak Supian Iskandar. Semoga Allah Swt. memberikan yang tempat terbaik di sisi-Nya.
- Kedua mertua tercinta: Ibu Tachaijaroh Joesoef atas segala kasih sayang dan doanya, dan Alm. Bapak Achmad Thohir, semoga Allah Swt. memberikan yang tempat terbaik di sisi-Nya.
- Seluruh Keluarga Besar Supian Iskandar (Ade dan keluarga, Sita, Tutun dan keluarga, anak-anak Alm. Yoki). Seluruh Keluarga Besar Achmad Thohir (Mas Udin dan keluarga, De Azis dan keluarga, De Ajuk dan keluarga, serta Icha dan keluarga).
- Teruntuk yang tersayang Keluarga Tadif: suami tercinta Taufiq Dwi Ferindra, anak-anak yang tersayang: Thariq Izzah Ramadhan, Zaidan Muhammad Sani, dan Vindy Resta Firanda, yang selalu sabar, menyemangati, mendoakan, dan mendampingi.

Semoga Allah Swt. membalas seluruh kebaikan dan bantuan Bapak dan Ibu semua. Semoga kita semua selalu mendapat limpahan Rahmat dan lindungan-Nya, serta menjadi hamba-Nya yang memberi manfaat.

*Aamiin yaa Robbal ‘alamiin.*

# DAFTAR PUSTAKA

- Adrian, M. R., & Roosmini, D. (2024). Identification and characteristic of microplastics in sediment and macrozoobenthos of upper Citarum River. *E3S Web of Conferences*, 485, Article 07005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448507005>
- Ariesyady, H. D., & Soemirat, J. (2024). *Toksikologi Lingkungan*. Universitas Gadjah Mada Press.
- Calamari, D. (1996). Environmental distribution and fate of chemical substances: A predictive approach. In M. Ruchirawat & R. C. Shank (Eds.), *Environmental toxicology* (Vol. 1). Chulaborn Research Institute.
- Deviyani, Salami, I. R. S., & Oginawati, K. (2024). Pesticide residue exposure effect on health, growth, and development among children from agricultural area. *E3S Web of Conferences*, 485, Article 07009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448507009>
- enHealth. (2012). *Environmental health risk assessment: Guidelines for assessing human health risks from environmental hazards*. Commonwealth of Australia. <https://www.health.gov.au/resources/publications/environmental-health-risk-assessment-guidelines-for-assessing-human-health-risks-from-environmental-hazards>
- Fahimah, N. (2024). *Penilaian risiko kesehatan masyarakat akibat pencemaran logam berat di lingkungan daerah aliran Sungai Citarum Hulu, Laporan Disertasi, Program Studi Doktor Teknik Lingkungan*. Institut Teknologi Bandung.
- Fahimah, N., Salami, I. R. S., Oginawati, K., Yapfrine, S. J., Supriatin, A., & Thaher, Y. N. (2023). Mapping and determining chemical of potential concerns from heavy metals in water usage in the upper watershed. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 9(4), 1–24. <https://doi.org/10.22034/gjesm.2023.04.02>
- Fahimah, N., Salami, I. R. S., Pitoi, M. M., Roosmini, D., Wulan, D. R., Oginawati, K., Mubiarto, H., & Rohman. (2025). *Pyrethroids in*

groundwater near the Citarum River: Insights into ecological and health risks. *Groundwater for Sustainable Development*, 29, Article 101422. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2025.101422>

Faathir Chalid, L. M., & Nastiti, A. (2025). Occurrence and health risk of phthalates in groundwater and surface water matrix: A case study of Kampung Daraulin, Citarum, Indonesia. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 15(7), 549–564. <https://doi.org/10.2166/washdev.2025.339>

Freitas, L. A. A., & Radis-Baptista, G. (2021). Pharmaceutical pollution and disposal of expired, unused, and unwanted medicines in the Brazilian context. *Journal of Xenobiotics*, 11(2), 61–76. <https://doi.org/10.3390/jox11020005>

Hasanawi, A., & Salami, I. R. S. (2022). Analysis of physicochemical and microbial parameters in refill drinking water sources and health risk assessment – A case study in Bandung District, Indonesia. *Journal Ecological Engineering and Environmental Technology*, Volume 23, Issue 4, 2022, pp. 45–56, ISSN 2719-7050, <https://doi.org/10.12912/27197050/149933>

Herwiandani, D. P. (2024). Analisis risiko kesehatan pajanan logam berat dalam debu PM<sub>2.5</sub> pada masyarakat Kabupaten Bandung pada Tiga Tata guna lahan yang berbeda, Laporan Tesis, Program Studi Magister Teknik Lingkungan,. Institut Teknologi Bandung.

Herwiandani, D. P., Salami, I. R. S., & Roosmini, D. (2024). Health risk analysis of heavy metal exposure bonded in PM<sub>2.5</sub> at industrial area in Bandung Regency. *E3S Web of Conferences*, 495, Article 03004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449503004>

Oginawati, K., Faiqah, N. S. A., Suharyanto, Regia, R. A., & Amin, M. (2024). Indoor PM<sub>2.5</sub> and heavy metal composition in blacksmithing factories: A pilot study in Bandung Regency, Indonesia. *Urban Science*, 8(4), Article 230. <https://doi.org/10.3390/urbansci8040230>

Oginawati, O., Nathanael, R. I., Chazanah, N., Suharyanto, Prabandari, D., Basuki, M. F., Oclandhi, B., Santoso, M., Febriana, S. W., Nugrahaningsih, D. A., Uhartini, S., Prakoeswa, C. R. S., & Tanziha, I. (2023). Occupational lead exposure health risk assessment and heme biosynthesis: A study on batik artisans in Yogyakarta, Indonesia.

Heliyon, 9(9), Article e19994.

<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19994>

- Pratiwi, A. I. W. (2024). Pencemaran udara dan risiko kesehatan masyarakat pada tata guna lahan berbeda di Kabupaten Bandung, Laporan Tesis, Program Studi Magister Teknik Lingkungan. Institut Teknologi Bandung.
- Pratiwi, A. I. W., Salami, I. R., & Roosmini, D. (2024). Health risk analysis of air pollutant exposure on children's lung function in industrial area of Bandung Regency. *E3S Web of Conferences*, 495, Article 03001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449503001>
- Prüss-Ustün, A., Wolf, J., Corvalán, C., Bos, R., & Neira, M. (2016). Preventing disease through healthy environments: A global assessment of the burden of disease from environmental risks. World Health Organization.
- Salami, I. R. S., As, Z. A., Marselina, M., & Roosmini, D. (2014). Respiratory health risk assessment of children living close to industrial areas in Indonesia. *Reviews on Environmental Health*, 29(1-2), 139–142. <https://doi.org/10.1515/reveh-2014-0025>
- Salami, I. R. S., Maulini, T., Iriany, & Roosmini, D. (2014). Ecotoxicological effects of textile waste effluents on *Daphnia magna* and *Allium cepa* in the upperstream segment of Citarum River, West Java, Indonesia. *Proceedings of the 11th International Symposium on Southeast Asian Water Environment (SEAWA 11)*, 9–16.
- Salami, I. R. S., Rahmawati, S., Sutarto, R. I. H., & Jaya, P. M. (2008). Accumulation of heavy metals in freshwater fish in cage aquaculture at Cirata Reservoir, West Java, Indonesia. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1140(1), 102–110. <https://doi.org/10.1196/annals.1454.037>
- Salami, I. R. S., Rahmawati, S., & Sutarto, R. I. H. (2012). Comparison of heavy metals levels in *O. niloticus* and *C. carpio* from floating cage aquaculture at Cirata Reservoir, Citarum River Basin in Indonesia. *Proceedings of the 10th International Symposium on Southeast Asian Water Environment*, 115–121.
- Salami, I.R.S., Rizaldi, D.K. (2017). Organics and Heavy Metals Content in River Receiving the Effluent of Municipal Landfill Leachate Treatment.

- In: Kurisu, F., Ramanathan, A., Kazmi, A., Kumar, M. (eds) Trends in Asian Water Environmental Science and Technology. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-39259-2\\_11](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39259-2_11)
- Salami, I. R. S., & Soemirat, J. (2024). Epidemiologi Lingkungan. Universitas Gadjah Mada Press.
- Salami, I. R. S., Thufailah, N. A., Fahimah, N., & Roosmini, D. (2025). Health risk assessment of physicochemical and heavy metals exposures of the usage of shallow groundwater located at the proximity to Citarum River, Indonesia. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, 11, Article 101153. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101153>
- Soemirat, J. (2011). Kesehatan Lingkungan. Universitas Gadjah Mada Press.
- Soemirat, J. (2013). Analisa Risiko Kesehatan. Universitas Gadjah Mada Press.
- Sopandi, Y., & Salami, I. R. S. (2013). Evaluasi pengaruh paparan radiasi terhadap efek sitotoksik dan genotoksik pada Allium cepa sebagai bioindikator kondisi lingkungan kerja bagian radiologi rumah sakit. Jurnal Teknik Lingkungan, 19(2), 205–214. <https://doi.org/10.5614/jtl.2013.19.2.10>
- Thompson, R. C., Moore, C. J., vom Saal, F. S., & Swan, S. H. (2009). Plastics, the environment and human health: Current consensus and future trends. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 364(1526), 2153–2166. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0053>
- U.S. Environmental Protection Agency. (n.d.). DDT - A brief history and status. <https://www.epa.gov/ingredients-used-pesticide-products/ddt-brief-history-and-status>
- Utami, R. R., Geerling, G. W., Salami, I. R. S., Notodarmojo, S., & Ragas, A. M. J. (2020a). Pesticide use data for emission modelling: A case study on the Upper Citarum River Basin. E3S Web of Conferences, 211, Article 03009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021103009>
- Utami, R. R., Geerling, G. W., Salami, I. R. S., Notodarmojo, S., & Ragas, A. M. J. (2020b). Agricultural pesticide use in the Upper Citarum River Basin: Basic data for model-based risk management. Journal of Environmental Science and Sustainable Development, 3(2), 235–260. <https://doi.org/10.22044/jessd.2020.123>

- Utami, R. R., Geerling, G. W., Salami, I. R. S., Notodarmojo, S., & Ragas, A. M. J. (2020c). Environmental prioritization of pesticide in the Upper Citarum River Basin, Indonesia, using predicted and measured concentrations. *Science of the Total Environment*, 738, Article 140130. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140130>
- Utami, R. R., Geerling, G. W., Salami, I. R. S., Notodarmojo, S., & Ragas, A. M. J. (2023a). Mapping domestic water use to quantify water-demand and water-related contaminant exposure in a peri-urban community, Indonesia. *International Journal of Environmental Health Research*, 34(1), 625–638. <https://doi.org/10.1080/09603123.2022.2163986>
- Utami, R. R., Yoga, G. P., Geerling, G. W., Salami, I. R. S., Notodarmojo, S., & Ragas, A. M. J. (2023b). Water usage pattern of peri-urban community in the river basin: Analyzing crucial variables for human exposure model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1263, Article 012036. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1263/1/012036>
- Yueh, M. F., & Tukey, R. H. (2016). Triclosan: A widespread environmental toxicant with many biological effects. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, 56, 251–272.



# CURRICULUM VITAE



Nama : Indah Rachmatiah Siti Salami  
Tempat/tgl lahir : Bandung 28 November 1965  
Kel. Keahlian : Teknologi Pengelolaan Lingkungan  
Alamat Kantor : Teknik Lingkungan FTSL ITB  
Jalan Ganesha No. 10 Bandung  
Nama Suami : Taufiq Dwi Ferindra  
Nama Anak : Thariq Izzah Ramadhan  
Zaidan Muhammad Sani  
Vindy Resta Firanda

## I. RIWAYAT PENDIDIKAN

| No | Jenjang Pendidikan | Perguruan Tinggi                           | Tahun Lulus | Bidang                    |
|----|--------------------|--|-------------|---------------------------|
| 1  | SD                 | SDN Sukaraja I Sumedang                    | 1977        | -                         |
| 2  | SMP                | SMP Negeri 13 Bandung                      | 1981        | -                         |
| 3  | SMA                | SMA Negeri 3 Bandung                       | 1984        | -                         |
| 4  | S-1                | Institut Teknologi Bandung                 | 1989        | Teknik Lingkungan         |
| 5  | S-2                | University of Newcastle Upon Tyne, Inggris | 1993        | Environmental Engineering |
| 6  | S-3                | University of Newcastle Upon Tyne, Inggris | 2000        | Environmental Engineering |

## II. RIWAYAT KERJA DI ITB

| No. | Nama Jabatan   | Tahun           |
|-----|--|-----------------|
| 1.  | Dosen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan | 1990 - sekarang |
| 2.  | Sekretaris Implementasi Program Magister Teknik Lingkungan   | 2002 - 2003     |
| 3.  | Kepala Laboratorium Higiene Industri dan Toksikologi         | 2002 - 2004     |
| 4.  | Sekretaris Departemen Teknik Lingkungan                      | 2004 - 2006     |
| 5.  | Ketua Program Studi Magister dan Doktor Teknik Lingkungan    | 2007 - 2011     |
| 6.  | Wakil Dekan Sumberdaya Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan  | 2015 - 2020     |
| 7.  | Kepala Pusat Studi Lingkungan Hidup (PSLH) ITB               | 2024 - sekarang |

### III. RIWAYAT KEPANGKATAN

| No. | Pangkat               | Golongan | TMT            |
|-----|-----------------------|----------|----------------|
| 1.  | Penata Muda           | III/a    | 1 Maret 1990   |
| 2.  | Penata Muda Tingkat I | III/b    | 1 Oktober 1995 |
| 3.  | Penata                | III/c    | 1 Oktober 2002 |
| 4.  | Penata Tingkat I      | III/d    | 1 April 2008   |
| 5.  | Pembina               | IV/a     | 1 Oktober 2011 |
| 6.  | Pembina Tingkat I     | IV/b     | 1 Oktober 2013 |
| 7.  | Pembina Utama Muda    | IV/c     | 1 Oktober 2015 |
| 8.  | Pembina Utama Madya   | IV/d     | 1 Agustus 2025 |

### IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

| No. | Nama Jabatan       | TMT              |
|-----|--------------------|------------------|
| 1.  | Asisten Ahli Madya | 1 Januari 1993   |
| 2.  | Asisten Ahli       | 1 September 1995 |
| 3.  | Lektor             | 1 Oktober 2002   |
| 4.  | Lektor Kepala      | 1 April 2011     |
| 5.  | Guru Besar         | 1 April 2025     |

### V. KEGIATAN PENELITIAN

| No. | Judul Penelitian  | Tahun/<br>Periode | Sumber dana                      |
|-----|---|-------------------|----------------------------------|
| 1.  | Perbaikan kualitas air pada anak Sungai Citarum dengan pemanfaatan tanaman air untuk peningkatan kualitas ikan budidaya di Waduk Cirata | 2012              | ITB                              |
| 2.  | Program Peningkatan Sanitasi Lingkungan Untuk Meningkatkan Kesehatan Masyarakat Di Lingkungan Sungai Cikapundung                        | 2013              | PM-ITB                           |
| 3.  | Penggunaan Matcrophyte untuk Perbaikan Kualitas Badan Air Penerima Eflen Limbah Industri di Majalaya                                    | 2014              | Program Riset Disentralisasi ITB |
| 4.  | Penggunaan Macrophyte untuk Perbaikan Kualitas Badan Air Penerima Eflen Limbah Industri di Majalaya Kabupaten Bandung                   | 2015              | Unggulan Perguruan Tinggi        |
| 5.  | Penerapan Teknologi Filter sederhana untuk perbaikan kualitas Air sungai Cikakembang di Majalaya Kabupaten Bandung                      | 2016              | Riset PM ITB                     |
| 6.  | Aplikasi Proses Aerasi untuk Perbaikan Kualitas Badan Air Penerima Eflen Limbah Industri di   | 2017              | Riset ITB                        |

| No. | Judul Penelitian  | Tahun/<br>Periode | Sumber dana                 |
|-----|---|-------------------|-----------------------------|
|     | Majalaya, Kabupaten Bandung   |                   |                             |
| 7.  | Identifikasi Pencemar pada Sumber Air Bersih Non-PDAM di DAS Citarum Hulu untuk Penilaian Risiko Kesehatan Masyarakat.  | 2020              | Riset P3MI - ITB            |
| 8.  | Penelitian Multiyears (3 Tahun) Penilaian beban pencemaran lingkungan terhadap risiko kesehatan pada masyarakat di DAS Citarum  | 2021              | P2MI - ITB                  |
| 9.  | Analisis Logam Berat pada Biomarker dan Hubungannya dengan Penilaian Risiko Kesehatan Masyarakat di DAS Citarum Hulu  | 2022              | P2MI - ITB                  |
| 10. | Penilaian dan Pemetaan Risiko Kesehatan Masyarakat dari Beban Pencemar Kualitas Udara di Kabupaten Bandung Sebagai Metode Prioritisasi Pengelolaan Lingkungan                   | 2022              | Riset Unggulan ITB          |
| 11. | Penilaian beban penyakit (burden of disease) berdasarkan risiko kanker kulit yang disebabkan oleh pajanan arsenik melalui penggunaan air di DAS Citarum Hulu                    | 2023              | P2MI - ITB                  |
| 12. | Pengembangan Indeks Penilaian Terintegrasi Status Lingkungan Dan Risiko Kesehatan Masyarakat Sebagai Metode Prioritisasi Pengelolaan Lingkungan (Studi Kasus Kabupaten Bandung) | 2023              | Penelitian Dana Mandiri ITB |

## VI. PUBLIKASI

### PENULISAN BUKU

| No. | Pengarang; Judul   | Tempat dan tahun publikasi   | Penerbit                    |
|-----|--|--|-----------------------------|
| 1.  | <b>Indah R.S. Salami</b> and Dimas K. Rizaldi, "Organics and Heavy Metals Content in River Receiving the Effluent of Municipal Landfill Leachate Treatment"<br><a href="https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-39259-2_11">https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-39259-2_11</a> | Book chapter in Trends in Asian Water Environmental Science and Technology. @2016, , Kolkata, New Delhi, pp. 127-138. ISBN 978-93-81891-28-5 | Capital Publishing Company  |
| 2.  | <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , "BAB 9. ERGONOMI" Chapter pada buku Kesehatan Dan Keselamatan Lingkungan Kerja"<br><a href="https://drive.google.com/drive/fold">https://drive.google.com/drive/fold</a>   | (Hal. 200 - 230), Cetakan Pertama Maret 2015, ISBN: 978-979-420-978-3, 369 Halaman   | Gajah Mada University Press |

| No. | Pengarang; Judul   | Tempat dan tahun publikasi   | Penerbit                    |
|-----|--|--|-----------------------------|
|     | <a href="https://drive.google.com/drive/folders/1MEH9ypz2O1rdHYq_ZlaSmfm72kw25CSV?usp=share_link">ers/1MEH9ypz2O1rdHYq_ZlaSmfm72kw25CSV?usp=share_link</a>   |  |                             |
| 3.  | <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , "BAB 10. KECELAKAAN KERJA" Chapter pada buku Kesehatan Dan Keselamatan Lingkungan Kerja<br><a href="https://drive.google.com/drive/folders/15zGuvyxq2tKsWEkPwzEP0eIPsCY5HfI0?usp=share_link">https://drive.google.com/drive/folders/15zGuvyxq2tKsWEkPwzEP0eIPsCY5HfI0?usp=share_link</a> | (Hal. 231 - 260), Cetakan Pertama Maret 2015, ISBN: 978-979-420-978-3, 369 Halaman | Gajah Mada University Press |

#### PUBLIKASI PADA JURNAL INTERNASIONAL

| No. | Pengarang; Judul makalah   | Nama jurnal; No. Publikasi; Vol./ tahun; ISSN; Tanggal, dan peringkat akreditasi  |
|-----|--|---|
| 1.  | Poppy Intan Tjahaja., Putu Sukmabuana., <b>Indah Rahmatiah Siti Salami.</b> , Barti Setiani Muntalif, "Laboratory experiment on the determination of radiostrontium transfer parameter in water – fish compartment system" | Journal of Environmental Radioactivity Volume 109, July 2012, Pages 60-63, ISSN. 18791700, Terindek SJR. 0.75 (2021) Q2 , H Index 96 - (2012-Q1)<br><a href="https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.01.003">https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2012.01.003</a>                               |
| 2.  | <b>Indah R.S. Salami.</b> , Zulfikar A. As., Mariana Marselina., Dwina Roosmini, "Respiratory health risk assesment of children living close to industrial areas in Indonesia"   | Reviews on Environmental Health Volume 29: Issue 1-2, Pages 139–142, Published online: 24 Feb 2014, eISSN 2191-0308, ISSN 0048-7554, Terindek SJR. 0.63 (2021) Q2 , H Index 57 - (2014-Q1)<br><a href="https://doi.org/10.1515/reveh-2014-0034">https://doi.org/10.1515/reveh-2014-0034</a> |
| 3.  | Mariana Marselina, Arwin Sabar, <b>Indah R S S Salami</b> , Dyah Marganingrum, "Primary pollutant selection and determination of water quality index in class discharge division based on three class markov model"        | International Journal of GEOMATE, Oct., 2017, Vol.13, Issue 38, pp.89-96, ISSN:2186-2990, Japan, Terindek SJR. 0.36 (2021) Q3 , H Index 21 - (2017-Q3)<br><a href="http://dx.doi.org/10.21660/2017.38.402807">http://dx.doi.org/10.21660/2017.38.402807</a>                                 |
| 4.  | Utami, Rosetyati R., Geerling, Gertjan W., <b>Salami, Indah R.S.</b> , Notodarmojo, Suprihanto., Ragas, Ad M.J, "Environmental prioritization of   | Journal Science of The Total Environment Volume 738, 10 October 2020, 140130, ISSN 00489697 Terindek  |

| No. Pengarang; Judul makalah  | Nama jurnal; No. Publikasi; Vol./ tahun; ISSN; Tanggal, dan peringkat akreditasi  |
|---|---|
| pesticide in the Upper Citarum River Basin, Indonesia, using predicted and measured concentrations"   | SJR. 1,81 (2021) Q1 , H Index 275 - (2020-Q1)<br><a href="https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140130">https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140130</a>  |
| 5. Eddy Iskandar Muda Nasution, Arwin Sabar, <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , Dyah Marganingrum, "Rationalization Of Discharge Data Fluctuations Using Minimum Residuals Model Of Moving Average Methods In Citarum Cascade Reservoirs"                | International Journal of GEOMATE, Nov, 2020, Vol.19, Issue 75, pp.209-214 ISSN 21862982 Terindek SJR. 0.36 (2021) Q3 , H Index 21 (2020-Q3)<br><a href="https://doi.org/10.21660/2020.75.2688">https://doi.org/10.21660/2020.75.2688</a>        |
| 6. Nasution, Eddy Iskandar Muda.,Sabar, Arwin., <b>Salami, Indah Rachmatiah Siti.</b> , Marganingrum, Dyah, "Multi-Objective Optimizations Of Hydroelectric Exploitation Using Dynamic Programs In Citarum Cascade Reservoirs "                             | International Journal of GEOMATE Volume 23, Issue 95, Pages 154 - 161, July 2022 ISSN 21862982 Terindek SJR. 0.36 (2021) Q3 , H Index 21 (2020-Q3)<br><a href="https://doi.org/10.21660/2022.95.1576">https://doi.org/10.21660/2022.95.1576</a> |
| 7. Rosetyati R. Utamia., Gertjan W. Geerling., <b>Indah R.S. Salami.</b> , Suprihanto Notodarmojo and Ad M. J. Ragas, "Mapping domestic water use to quantify water-demand and water-related contaminant exposure in a peri-urban community,                | Indonesia", International Journal of Environmental Health Research, ISSN.09603123 Terindek SJR. 0.57 (2021) Q2 , H Index 52<br><a href="https://doi.org/10.1080/09603123.2022.2163986">https://doi.org/10.1080/09603123.2022.2163986</a>        |
| 8. Fahimah, N., <b>Salami, I.R.S*</b> , Oginawati, K., Susetyo, S.H., Tambun, A., Ardiwinata, A.N., Sukarjo., (2023). The assessment of water quality and human health risk from pollution of chosen heavy metals in the Upstream Citarum River, Indonesia. | Journal of Water and Land Development, No. 56 (I-III), 153 – 163. ISBN 20834535, "Terindek SJR. 0.29 (2021) Q2 , H Index 21<br><a href="https://doi.org/10.24425/jwld.2023.143756">https://doi.org/10.24425/jwld.2023.143756</a> 2023           |
| 9. Fahimah, N.; <b>Salami, I.R.S.;</b> Oginawati, K.; Yapfrine, S.J.; Supriatin, A.; Thaher, Y.N., (2023). Mapping and determining chemical of potential concerns from heavy  | Global J. Environ. Sci. Manage., 9(4): 1-24. Print ISSN: 2383-3572, Online ISSN: 2383-3866, Terindek SJR. 0.57 (2021) Q1, H Index 28  |

| No. Pengarang; Judul makalah   | Nama jurnal; No. Publikasi; Vol./ tahun; ISSN; Tanggal, dan peringkat akreditasi   |
|--|--|
| metals in water usage in the uppers watershed.   | <a href="https://doi.org/10.22034/gjesm.2023.04.02">https://doi.org/10.22034/gjesm.2023.04.02</a>  |
| 10. Adib Hasanawi., <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , "Analysis of Physicochemical and Microbial Parameters in Refill Drinking Water Sources and Health Risk Assessment: A Case Study in Bandung District, Indonesia"  | Journal Ecological Engineering and Environmental Technology, Volume 23, Issue 4, 2022, pp. 45–56, ISSN 2719-7050, Terindek SJR. 0 (2021), H Index 3<br><a href="https://doi.org/10.12912/27197050/149933">https://doi.org/10.12912/27197050/149933</a> |
| 11. Fahimah, N., <b>Salami, I.R.S.</b> , Oginawati, K., Thaher, Y.N., " <u>Variations of groundwater turbidity in the Bandung regency, Indonesia: From community-used water quality monitoring data</u> "  | HydroResearch, Volume 6, 2023, Pages 216-227, ISSN 2589-7578,<br><a href="https://doi.org/10.1016/j.hydres.2023.06.001">https://doi.org/10.1016/j.hydres.2023.06.001</a>   |
| 12. Nurul Fahimah, <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , Katharina Oginawati, Har yo Mubiarto, "Appraisal of pollution levels and non-carcinogenic health risks associated with the emergence of heavy metals in Indonesian community water for sanitation, hygiene, and consumption". | Emerging Contaminants, Volume 10, Issue 3, 2024, 100313, ISSN 2405-6650,<br><a href="https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100313">https://doi.org/10.1016/j.emcon.2024.100313</a> .  |
| 13. Nurul Fahimah, <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , Mariska Margaret Pitoi, Dwina Roosmini, Diana Rahayuning Wulan, Katharina Oginawati, Haryo Mubiarto, Oman Rohman, "Pyrethroids in groundwater near the Citarum River: Insights into ecological and health risks".             | Groundwater for Sustainable Development, Volume 29, 2025, 101422, ISSN 2352-801X,<br><a href="https://doi.org/10.1016/j.gsd.2025.101422">https://doi.org/10.1016/j.gsd.2025.101422</a> .   |
| 14. <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , Nadya Aulia Thufailah, Nurul Fahimah, Dwina Roosmini, "Health risk assessment of physicochemical and heavy metals exposures of the usage of shallow groundwater located at the proximity to Citarum River, Indonesia".                       | Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, Volume 11, 2025, 101153, ISSN 2666-0164,<br><a href="https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101153">https://doi.org/10.1016/j.cscee.2025.101153</a> .  |

PUBLIKASI PADA JURNAL NASIONAL

| No. Pengarang; Judul makalah  | Nama jurnal; No. Publikasi; Vol./ tahun; ISSN; Tanggal, dan peringkat akreditasi  |
|---|---|
| 1. Lieza Corsita, Arwin, Barti Setiani Muntalif, <b>Indah Rachmatiah S. Salami</b> , "Pengukuran Kualitas Air di Waduk Jatiluhur, Bagian Hilir Sistem Kaskade Citarum Menggunakan Parameter Fisika Kimia Tertentu"      | Jurnal Rekayasa Kimia dan Lingkungan Vol. 10, No. 1, hlm. 40 - 48, 2014; ISSN 1412-5064, Terakreditasi S2; Impact 0,60; H5-index 14 (2021)<br><br><a href="https://doi.org/10.23955/rkl.v10i1.2171">https://doi.org/10.23955/rkl.v10i1.2171</a>   |
| 2. Mariana Marselina, Arwin Sabar, <b>Indah R S Salami</b> , and Dyah Marganingrum, "Management Optimization of Saguling Reservoir with Bellman Dynamic Programming and 'Du Couloir' Iteratve Method"                   | Forum Geografi, Vol 30 (1) July 2016: 14-23, Indonesian Journal of Spatial and Regional Analysis", ISSN: 0852-0682, E-ISSN: 2460-3945, Terakreditasi S2; Impact 1,50; H5-index 21 (2021)<br><br><a href="https://garuda.kemdikbud.go.id/documents/detail/2362112">https://garuda.kemdikbud.go.id/documents/detail/2362112</a> |
| 3. Taufiq Ihsan, <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , "Fatigue in Shift Work on Stamping Division Workers of PT. Toyota Motor Manufacturing Indonesia"   | Jurnal Kesehatan Masyarakat, Vo. 15, No. 3, hlm. 316-323, 2020 ISSN: 2355-3596, Terakreditasi S1; Impact 1,17; H5-index 45 (2021)<br><br><a href="https://doi.org/10.15294/kemas.v15i3.20854">https://doi.org/10.15294/kemas.v15i3.20854</a>  |
| 4. Rosetyati R. Utami, Gertjan W. Geerling, <b>Indah R.S. Salami</b> , Suprihanto Notodarmojo, Ad M.J. Ragas, "Agricultural Pesticide Use In The Upper Citarum River Basin: Basic Data For Model-Based Risk Management" | Journal of Environmental Science and Sustainable Development, Volume 3, Issue 2, Page 235-260, Terakreditasi S2; Impact 0,47; H5-index 7 (2021)<br><br><a href="https://doi.org/10.7454/jessd.v3i2.1076">https://doi.org/10.7454/jessd.v3i2.1076</a>  |
| 5. Mariana Marselina, Arwin Sabar, <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , Dyah Marganingrum, "Penentuan Bod, Zn, Dan No3-N Di Waduk Saguling Pada Setiap Pembagian Kelas Tahun Berdasarkan Diskrit Markov 3 Dan 5 Kelas" | JURNAL MANUSIA & LINGKUNGAN, 2017, 24(3):125-130 ISSN 085445510, Terakreditasi S3; Impact 0,00; H5-index 24 (2021)<br><br><a href="https://doi.org/10.22146/jml.23061">https://doi.org/10.22146/jml.23061</a>   |
| 6. Dwiki Irvan Mahardika dan <b>Indah Rachmatiah S. Salami</b> , "Profil Distribusi Pencemaran Logam Berat Pada Air Dan Sedimen Aliran Sungai Dari Air Lindi Tpa Sari Mukti"  | Jurnal Teknik Lingkungan Volume 18 Nomor 1, April 2012 (Hal 30-42) p-ISSN 8549796,<br><br><a href="https://doi.org/10.5614/jtl.2012.18.1.4">https://doi.org/10.5614/jtl.2012.18.1.4</a>   |

| No. Pengarang; Judul makalah  | Nama jurnal; No. Publikasi; Vol./ tahun; ISSN; Tanggal, dan peringkat akreditasi   |
|---|--|
| 7. Yunika Sopandi dan <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , "Evaluasi Pengaruh Paparan Radiasi Terhadap Efek Sitotoksik Dan Genotoksik Pada Allium Cepa Sebagai Bioindikator Kondisi Lingkungan Kerja Bagian Radiologi Rumah Sakit"                               | Jurnal Teknik Lingkungan Volume 19 Nomor 2, Oktober 2013 (Hal 205-214) p-ISSN 8549796<br><a href="https://doi.org/10.5614/jtl.2013.19.2.10">https://doi.org/10.5614/jtl.2013.19.2.10</a> |
| 8. Fairuz Zaharani, dan <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , "Kandungan Merkuri Pada Urin Dan Rambut Sebagai Indikasi Paparan Merkuri Terhadap Pekerja Tambang Emas Tanpa Izin (Peti) Di Desa Pasar Terusan Kecamatan Muara Bulian Kabupaten Batanghari – Jambi" | Jurnal Teknik Lingkungan Volume 21 Nomor 2, Oktober 2015 (Hal 169-179) p-ISSN 8549796<br><a href="https://doi.org/10.5614/jtl.2015.21.2.7">https://doi.org/10.5614/jtl.2015.21.2.7</a>   |
| 9. Lamtua Purba, <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , dan Benno Rahardyan, "Pemilihan Metode Identifikasi Bahaya Dan Analisis Resiko Serta Penerapannya Menggunakan Ahp (Analytical Hierarchy Process) Di Industri Manufaktur"                                   | Jurnal Teknik Lingkungan Volume 23 Nomor 1 April 2017 (Hal 22-31) p-ISSN 8549796<br><a href="https://doi.org/10.5614/j.tl.2017.23.1.3">https://doi.org/10.5614/j.tl.2017.23.1.3</a>      |
| 10. Pratikto Abiseno, dan <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , "Pengaruh Faktor Lingkungan Kerja Dan Beban Kerja Terhadap Faktor Kelelahan Kerja Pada Pekerja Full-Machinery Manufaktur Ban Di Cikarang"   | Jurnal Teknik Lingkungan Volume 23 Nomor 2, Oktober 2017 (Hal 73-82) p-ISSN 8549796<br><a href="https://doi.org/10.5614/j.tl.2017.23.2.8">https://doi.org/10.5614/j.tl.2017.23.2.8</a>   |

#### PUBLIKASI PADA PROSIDING SEMINAR INTERNASIONAL

| No. Pengarang; Judul makalah  | Nama seminar; Tahun, ISBN, Tempat publikasi   |
|---|---|
| 1. Novi Fitria., Enri Damanhuri., <b>Indah R.S Salami</b> , "Assessment of Infectious Waste Management Practices at Hospital with Excellent Accreditation Level in Bandung, Cimahi and East Jakarta, Indonesia" | MATEC Web of Conferences, Volume 147, 2018, Article Number 08004, eISSN: 2261-236X<br><a href="https://doi.org/10.1051/mateconf/201814708004">https://doi.org/10.1051/mateconf/201814708004</a> |
| 2. Mariana Marselina., Arwin Sabar1, <b>Indah R S Salami</b> ., Dyah Marganingrum, "Alternative Intake Station in Saguling Reservoir for The Needs of Raw Water in Bandung Metropolitan Area"                   | MATEC Web of Conferences, Volume 147, 2018, Article Number 03015 , eISSN: 2261-236X   |

| No. | Pengarang; Judul makalah  | Nama seminar; Tahun, ISBN, Tempat publikasi  |
|-----|---|--|
|     |   | <a href="https://doi.org/10.1051/mateconf/201814703015">https://doi.org/10.1051/mateconf/201814703015</a>  |
| 3.  | D.Roosmini., M.A Septiono., N.E. Putri., H.M. Shabrina., <b>I.R.S.Salami.</b> , H.D. Ariesyady, "River Water Pollution Condition in Upper Part Of Brantas River and Bengawan Solo River"                  | IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Volume 106, Issue 1, 31 January 2018, Article number 012059, ISSN: 17551307<br><a href="https://doi.org/10.1088/1755-1315/106/1/012059">https://doi.org/10.1088/1755-1315/106/1/012059</a>  |
| 4.  | Fitria, N.,Damanhuri, E., <b>Salami, I.R.S.</b> , "Evaluation of hospital infectious waste management in Bandung region",   | IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 106, Issue 1, 31 January 2018, Article number 012012, ISSN: 17551307<br><a href="https://doi.org/10.1088/1755-1315/160/1/012012">https://doi.org/10.1088/1755-1315/160/1/012012</a> |
| 5.  | Novi Fitria, Enri Damanhuri, <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , Venny Ulya Bunga and Yati Supriatin, "Generation and Proportion Assessment of Hospitals Infectious Waste in Bandung Region Indonesia", | E3S Web of Conferences 73, 07018 (2018) eISSN: 2267-1242<br><a href="https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187307018">https://doi.org/10.1051/e3sconf/20187307018</a>  |
| 6.  | <b>Salami, I.R.S.</b> , Pradita, D.P, "The Effect of Aeration on River Water Receiving Industrial Discharges to Its Quality and Toxicity"   | E3S Web of Conferences, Volume 148, 2020, Article Number.05010, eISSN: 2267-1242<br><a href="https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014805010">https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014805010</a>  |
| 7.  | Fitria, N., Damanhuri, E., <b>Salami, I.R.S.</b> , "Evaluation of hospital infectious waste management (HIWM) implementation based on applicable regulations in Bandung"                                  | IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, Volume. 483 Issue 1,Article number 012026, ISSN 17551307<br><a href="https://doi.org/10.1088/1755-1315/483/1/012026">https://doi.org/10.1088/1755-1315/483/1/012026</a>              |
| 8.  | Utami, R.R., Geerling, G.W., <b>Salami, I.R.S.</b> , Notodarmojo, S., Ragas, A.M.J., "Pesticide use data for emission modelling: A case study on the Upper Citarum River Basin"                           | E3S Web of Conferences, Volume 211, 2020, Article number 03009, eISSN: 2267-1242<br><a href="https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021103009">https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021103009</a>  |
| 9.  | Putri S Kamila and <b>Indah R S Salami</b> , "Study of Clean Water and Sanitation Access and Its Relationship to  | IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Volume 1065, Issue 1- 2022 Article  |

| No. | Pengarang; Judul makalah   | Nama seminar; Tahun, ISBN, Tempat publikasi  |
|-----|--|--|
|     | Waterborne and Stunting Prevalence in Bandung Regency"   | number 012039, ISSN 17551307<br><br><a href="https://doi.org/10.1088/1755-1315/1065/1/012039">https://doi.org/10.1088/1755-1315/1065/1/012039</a>  |
| 10. | R R Utami., <b>I R S Salami.</b> , G W Geerling., S Notodarmojo., A M J Ragas,"Health risk-based prioritization approaches of pharmaceuticals in the Upper Citarum River Basin"                        | IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Volume 1065, Issue 1- 2022 Article number 012064, ISSN 17551307<br><a href="https://doi.org/10.1088/1755-1315/1065/1/012064">https://doi.org/10.1088/1755-1315/1065/1/012064</a>  |
| 11. | A Hasanawi., <b>I R S Salami.</b> , N Athufailah, "Spatial analysis of health risk due to contamination groundwater resources (a case study in Bandung District, Indonesia)"                           | IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Volume 1109, Issue 1 - 2022 Article number 012074, ISSN 17551307<br><a href="https://doi.org/10.1088/1755-1315/1109/1/012074">https://doi.org/10.1088/1755-1315/1109/1/012074</a> |
| 12  | Devita Putri Herwiandani, <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , and Dwina Roosmini, "Health risk analysis of heavy metal exposure bonded in PM2.5 at industrial area in Bandung Regency"               | E3S Web of Conferences 495, 03004 (2024)<br><a href="https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449503004">https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449503004</a>  |
| 13  | Agustina Ircha Winda Pratiwi, <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , Dwina Roosmini, "Health risk analysis of air pollutant exposure on children's lung function in industrial area of Bandung Regency" | E3S Web of Conferences 495, 03001 (2024)<br><a href="https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449503001">https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449503001</a>  |
| 14  | Deviyani, <b>Salami, I. R. S.</b> , & Oginawati, K. "Pesticide residue exposure effect on health, growth, and development among children from agricultural area".                                      | E3S Web of Conferences, 485, Article 07009.<br><a href="https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448507009">https://doi.org/10.1051/e3sconf/202448507009</a>   |
| 15  | Tuani Lidiawati Simangunsong and <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , ""Environmental risk assessment of landfill"  | E3S Web of Conferences 495, 03009 (2024)<br><a href="https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449503009">https://doi.org/10.1051/e3sconf/202449503009</a>  |
| 16  | Khaila Nursofa and <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , "The Potential Risk of Ambient PM2.5 and PM10 Exposure on Low Birth Weight Cases in Three Districts of Bandung Regency"                       | IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science1448 (2025) 012003 IOP Publishing<br><a href="http://doi.10.1088/1755-1315/1448/1/012003">http://doi.10.1088/1755-1315/1448/1/012003</a>  |

| No. | Pengarang; Judul makalah  | Nama seminar; Tahun, ISBN, Tempat publikasi  |
|-----|---|--|
| 17  | H K S Lahino and <b>I R S Salami</b> , "Public perception, exposure, and risk perception of air pollution in Bandung Regency"   | IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 1448 (2025) 012004 IOP Publishing <a href="http://doi:10.1088/1755-1315/1448/1/012004">http://doi:10.1088/1755-1315/1448/1/012004</a>  |
| 18  | Farida Nurul I Yusriyani and <b>Indah Rachmatiah Siti Salami</b> , " Filtration Process Study For Water Quality Enhancement In Textile Wastewater Polluted River (Case Study: Cikacembang River, Majalaya, Kabupaten Bandung)                                   | Proceeding, 6th International Symposium On Technology For Sustainability (ISTS 2016), 12-14 Oktober 2016, Yogyakarta. Vocational College UGM, Kosen National Institute of Technology, Nagaoka Univ. of Technology; Toyohashi Univ. of Technology ISBN: 978-602-1159-20-0                             |
| 19. | <b>Indah Rachmatiah S. Salami</b> , Suphia Rahmawati, and Ratri I.H.Sutarto, "Comparasion of Heavy Metals Levels in <i>O. niloticus</i> and <i>C. carpio</i> from Floating Cage Aquaculture at Cirata Reservoir, Citarum River Basin in Indonesia"              | Proceedings of the 10th International Symposium on Southeast Asian Water Environment, 8-10 November 2012, Vietnam. Page. 115 -121 - B1-1 <a href="http://www.recwet.t.u-tokyo.ac.jp/asian_water2012/">http://www.recwet.t.u-tokyo.ac.jp/asian_water2012/</a>   |
| 20. | <b>Indah Rachmatiah Siti SALAMI</b> , Tika MAULINI, Marthalina IRIANY and Dwina Roosmini, "Ecotoxicological effects of textile waste effluents on <i>Daphnia magna</i> and <i>Allium cepa</i> in the upperstream segment of Citarum River, West Java, Indonesia | Proceedings of the 11th International Symposium on Southeast Asian Water Environment (SEAWE 11), 26-28 November 2014, AIT Conference Center, Bangkok, Thailand Page. 9-16 - A1-2 <a href="http://www.recwet;t;u-tokyo-ac.jp/asian_water2014/">http://www.recwet;t;u-tokyo-ac.jp/asian_water2014/</a> |

## VII. PENGHARGAAN

| No. | Nama Penghargaan  | Pemberi penghargaan | Tahun |
|-----|---|---------------------|-------|
| 1   | Satyalancana Karya Satya X Tahun                                  | Presiden RI         | 2003  |
| 2   | Satyalancana Karya Satya XX Tahun                                 | Presiden RI         | 2013  |
| 3   | Piagam Penghargaan Pengabdian 25 Tahun Institut Teknologi Bandung | ITB                 | 2016  |
| 4   | Satyalancana Karya Satya XXX Tahun                                | Presiden RI         | 2023  |
| 5   | Piagam Penghargaan Pengabdian 35 Tahun Institut Teknologi Bandung | ITB                 | 2025  |

## VIII. SERTIFIKASI

| No | Sertifikat Profesi dan Kompetensi   | Lembaga               | Tahun          |
|----|---|-----------------------|----------------|
| 1  | Profesi Insinyur Teknik Lingkungan  | ITB                   | September 2019 |
| 2  | Sertifikat Pelatihan Dasar Amdal  | Pusdiklat SDM<br>KLHK | Juli 2024      |
| 3  | Sertifikat Kompetensi Ahli Teknik Lingkungan Bidang Jasa Konstruksi                                       | BNSP - IATPI          | Februari 2025  |
| 4  | Sertifikat Kompetensi – Asesor Kompetensi   | BNSP – LSP P1<br>ITB  | Agustus 2025   |
| 5  | Sertifikat Kelulusan Bimbingan Teknis Calon Ahli Bersertifikat Penilai Amdal dan Uji Kelayakan Lingkungan | BKPSL                 | September 2025 |



**ITB PRESS**

📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,  
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132  
☎ +62 22 20469057  
🌐 [www.itbpress.id](http://www.itbpress.id)  
✉ [office@itbpress.id](mailto:office@itbpress.id)  
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92  
APPTI No. 005.062.1.10.2018

**Forum Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung**

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132  
E-mail: [sekretariat-fgb@itb.ac.id](mailto:sekretariat-fgb@itb.ac.id)  
Telp. (022) 2512532  
🌐 [fgb.itb.ac.id](http://fgb.itb.ac.id)    [f FgbITb](https://www.facebook.com/FgbITb)    [t FGB\\_ITB](https://twitter.com/FGB_ITB)  
📍 [@fgbitb\\_1920](https://www.instagram.com/fgbitb_1920)    [y Forum Guru Besar ITB](https://www.youtube.com/ForumGuruBesarITB)

