

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Air bersih merupakan kebutuhan dasar manusia yang esensial untuk mempertahankan kehidupan dan menunjang kesehatan, sebagaimana tercantum dalam Sustainable Development Goals (SDG) 6 yang menargetkan ketersediaan dan pengelolaan air bersih serta sanitasi yang berkelanjutan bagi semua orang pada tahun 2030. Akses terhadap air minum yang aman mencakup tidak hanya ketersediaan kuantitas yang cukup, tetapi juga kualitas yang aman terhadap kontaminan biologis maupun kimia, serta aksesibilitas yang memadai bagi seluruh lapisan masyarakat. Meskipun berbagai upaya global telah dilakukan, kemajuan pencapaian target tersebut masih berjalan lambat; data global menunjukkan bahwa pada periode 2015–2020 proporsi penduduk dunia yang memiliki akses terhadap layanan air minum aman hanya meningkat dari 70% menjadi 74% (UNICEF & WHO, 2021). Tren ini menggambarkan bahwa tantangan pemenuhan kebutuhan air minum yang aman masih signifikan, khususnya di negara berkembang termasuk Indonesia.

Di Indonesia, tantangan kualitas air minum juga menjadi isu penting seiring dengan pertumbuhan industri, urbanisasi, dan perubahan tata guna lahan yang memengaruhi integritas sumber daya air. Berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa kegiatan industri dan aktivitas antropogenik lainnya dapat menyebabkan akumulasi logam berat di tanah dan air tanah, yang selanjutnya berdampak terhadap kesehatan masyarakat jika masuk ke dalam rantai konsumsi manusia (Hendrayana et al., 2024; Faturrahmi, 2018). Pemerintah Indonesia melalui Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 telah menetapkan persyaratan kualitas air minum yang meliputi aspek fisik, kimia, mikrobiologi, dan radioaktivitas, termasuk batas maksimum kontaminan logam berat tertentu. Secara fisik, air minum tidak boleh berwarna, berbau, atau berasa; secara mikrobiologis harus bebas dari organisme patogen; dan secara kimia tidak boleh mengandung zat yang dapat menimbulkan gangguan kesehatan bila dikonsumsi dalam jangka panjang. Walaupun kerangka ini telah ada, implementasi dan pemantauan kualitas air minum di berbagai daerah masih menghadapi kendala, terutama di kawasan yang dipengaruhi oleh aktivitas industri.

Sumber air tanah menjadi pilihan utama bagi banyak masyarakat Indonesia sebagai sumber air minum, baik melalui sumur gali, sumur bor, maupun sebagai bahan baku bagi industri air minum isi ulang (DAMIU). Hal ini disebabkan oleh keterbatasan akses terhadap air perpipaan yang memadai di banyak wilayah, sehingga DAMIU menjadi alternatif yang mendekati kebutuhan dasar masyarakat. Namun, keberadaan DAMIU juga menimbulkan kekhawatiran terkait kualitas air, terutama apabila air baku yang digunakan berasal dari sumber air tanah yang telah terkontaminasi oleh aktivitas antropogenik. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa air tanah di sekitar kawasan industri sering kali menunjukkan penurunan kualitas akibat peningkatan konsentrasi logam berat dan zat terlarut lainnya (Hendrayana et al., 2025; Mustafa et al., 2022).

Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan (Pangkep) di Provinsi Sulawesi Selatan merupakan salah satu wilayah yang menghadapi tantangan tersebut. Wilayah ini memiliki karakter geografis yang unik dengan kombinasi daratan dan kepulauan, sehingga pola pemanfaatan sumber daya air sangat beragam. Sebagian besar masyarakat di wilayah daratan memanfaatkan air tanah dangkal melalui sumur gali dan bor sebagai sumber utama air minum dan sebagai bahan baku DAMIU, sedangkan masyarakat di pulau-pulau lebih mengandalkan air hujan yang ditampung. Perbedaan sumber air ini menyebabkan tantangan kualitas air yang berbeda pula di wilayah daratan dan kepulauan. Kecamatan Bungoro, salah satu kecamatan di Pangkep, menjadi fokus perhatian karena tingginya konsentrasi aktivitas industri semen dan pertambangan batu kapur yang berpotensi menjadi sumber pencemaran logam berat seperti Pb dan CrVI di lingkungan sekitarnya.

Aktivitas industri semen di Bungoro mencakup proses penambangan bahan baku, penghancuran batu kapur, pembakaran klinker menggunakan batu bara, dan proses penggilingan yang semuanya dapat menghasilkan emisi padat maupun gas yang mengandung logam berat. Debu industri, fly ash, serta limbah pembakaran batu bara dilepaskan ke udara, kemudian terbawa angin dan mengendap di tanah dan badan air permukaan, yang selanjutnya dapat meresap ke dalam tanah dan mencemari air tanah yang menjadi sumber air baku DAMIU (Murodif et al., 2025; Permatasari et al., 2023). Penelitian di berbagai kawasan industri di Indonesia menunjukkan bahwa polutan industri seperti Pb, Cr, Cd, dan As sering terdeteksi dalam air tanah di daerah sekitar operasi industri, sehingga beberapa sampel air tanah tidak lagi memenuhi baku mutu air minum (Astuti et al., 2021; Samawi et al., 2020). Kondisi ini menjadi lebih kompleks karena masyarakat di Bungoro dan sekitarnya sebagian besar tergantung pada DAMIU sebagai sumber air minum setiap hari, sehingga potensi pajanan terhadap logam berat melalui konsumsi air minum menjadi nyata.

Pb dan CrVI merupakan dua logam berat yang telah banyak diteliti dari sudut pandang toksikologi dan kesehatan masyarakat. Pb tidak memiliki fungsi biologis dan bersifat akumulatif dalam tubuh, terutama di ginjal, tulang, dan sistem saraf. Paparan kronis Pb bahkan pada konsentrasi rendah dapat menyebabkan gangguan fungsi hematologi, keterlambatan perkembangan neurologis pada anak, serta gangguan organ vital lainnya (ATSDR, 2020; Tchounwou et al., 2014). Sedangkan CrVI bersifat lebih reaktif dan mudah diserap melalui saluran cerna serta memiliki dua jalur risiko sekaligus non-karsinogenik dan karsinogenik. CrVI dapat menghasilkan radikal bebas yang menyebabkan kerusakan DNA dan mutasi genetik sehingga meningkatkan risiko kanker saluran cerna bila terpapar secara kronis melalui konsumsi air minum (USEPA, 1998; Tumolo et al., 2020). Karakter khas toksikokinetik dan toksikodinamik kedua logam ini menjadikannya fokus utama dalam evaluasi risiko kesehatan melalui jalur konsumsi air minum.

Meskipun beberapa penelitian telah meneliti dampak logam berat terhadap kualitas air tanah dan risiko kesehatan di berbagai wilayah, kajian yang secara komprehensif mengevaluasi pajanan Pb dan CrVI melalui konsumsi DAMIU, termasuk perhitungan intake, RQ, dan ECR pada masyarakat yang hidup di lingkungan industri seperti Bungoro, masih terbatas. Kekosongan ini menunjukkan

adanya gap penelitian penting, di mana bukti ilmiah yang menggabungkan parameter konsumsi masyarakat, karakteristik DAMIU, dan model risiko kesehatan secara terpadu masih diperlukan untuk memberikan dasar ilmiah bagi pengambilan kebijakan lokal terkait pengelolaan sumber air dan kesehatan masyarakat. Penelitian ini diharapkan dapat mengisi gap tersebut dengan mengevaluasi secara menyeluruh pajanan Pb dan CrVI melalui konsumsi DAMIU di Kecamatan Bungoro serta implikasinya terhadap kesehatan masyarakat.

Dengan demikian, kajian ini dilatarbelakangi oleh kebutuhan untuk memahami secara menyeluruh hubungan antara kualitas air DAMIU, frekuensi serta durasi pajanan masyarakat, dan potensi dampak kesehatan yang timbul dari paparan logam berat. Penelitian ini penting tidak hanya untuk menilai situasi saat ini, tetapi juga untuk merumuskan rekomendasi pengelolaan air minum dan perlindungan kesehatan masyarakat di wilayah yang terpengaruh oleh aktivitas industri berat di masa depan.

1.2 Teori Tentang Logam Berat Timbal (Pb) dan Kromium (Cr) serta Dampaknya terhadap Kesehatan Manusia

Logam berat merupakan unsur kimia dengan massa jenis tinggi yang bersifat persisten di lingkungan serta memiliki potensi toksisitas yang tinggi terhadap manusia. Keberadaan logam berat di lingkungan, khususnya di perairan, menjadi perhatian serius karena dapat mencemari sumber air minum dan terakumulasi dalam tubuh manusia melalui pajanan jangka panjang. Di antara berbagai jenis logam berat, timbal (Pb) dan kromium (Cr), terutama kromium heksavalen (CrVI), termasuk logam berat yang paling berbahaya bagi kesehatan manusia (WHO, 2017).

Timbal (Pb) merupakan logam berat non-esensial yang tidak memiliki fungsi biologis dalam tubuh manusia. Pb bersifat toksik meskipun terpapar dalam konsentrasi rendah dan cenderung bersifat akumulatif. Sumber pencemaran Pb di lingkungan berasal dari aktivitas industri, pertambangan, emisi kendaraan bermotor, pembakaran bahan bakar fosil, serta korosi pipa dan instalasi air yang mengandung timbal (Palar, 2004; ATSDR, 2017). Dalam sistem air minum, Pb umumnya masuk melalui proses korosi pipa distribusi, keran, dan sambungan berbahan timbal, serta dari sumber air tanah yang telah terkontaminasi limbah industri. Paparan Pb pada manusia dapat terjadi melalui jalur oral (konsumsi air dan makanan), inhalasi, maupun kontak tidak langsung melalui debu yang terkontaminasi (Ardillah, 2018). Secara toksikokinetik, Pb yang masuk ke dalam tubuh akan diserap dan sebagian besar terikat pada sel darah merah, kemudian didistribusikan ke jaringan lunak seperti hati, ginjal, dan otak, serta disimpan dalam jaringan keras seperti tulang dan gigi sebagai reservoir jangka panjang. Ekskresi Pb berlangsung sangat lambat, terutama melalui urin dan feses, sehingga paparan kronis dapat menyebabkan akumulasi dalam tubuh. Dampak kesehatan akibat paparan timbal sangat luas dan mencakup berbagai sistem organ. Pb diketahui dapat menghambat enzim yang berperan dalam sintesis hemoglobin sehingga menyebabkan anemia. Selain itu, Pb bersifat neurotoksik dan dapat mengganggu sistem saraf pusat dan perifer, terutama pada anak-anak, yang berdampak pada penurunan kecerdasan (IQ), gangguan perilaku, dan gangguan perkembangan kognitif (Hasanah et al., 2021).

Pada orang dewasa, paparan kronis Pb dapat menyebabkan gangguan fungsi ginjal, hipertensi, gangguan reproduksi, serta peningkatan risiko gangguan neurologis dan kardiovaskular (Putra et al., 2023).

Kromium (Cr) merupakan logam berat yang secara alami terdapat di lingkungan dan hadir dalam beberapa bentuk valensi, yaitu kromium trivalen (CrIII) dan kromium heksavalen (CrVI). CrIII merupakan unsur esensial dalam jumlah kecil bagi tubuh manusia, sedangkan CrVI bersifat sangat toksik, mudah larut dalam air, dan bersifat karsinogenik. Sumber utama pencemaran kromium heksavalen di lingkungan berasal dari aktivitas industri, seperti industri penyamakan kulit, pelapisan logam (electroplating), industri baja, industri kimia, serta pembuangan limbah cair industri ke badan air. Selain itu, CrVI juga dapat masuk ke perairan melalui proses alami seperti pelapukan batuan dan deposisi dari udara melalui hujan (Andini, 2017; Liang et al., 2017). Paparan CrVI pada manusia terutama terjadi melalui konsumsi air minum yang terkontaminasi. Secara toksikokinetik, CrVI lebih mudah diserap dibandingkan CrIII karena mampu menembus membran sel melalui sistem transport anion. Di dalam tubuh, CrVI mengalami proses reduksi bertahap menjadi CrIII yang menghasilkan spesies oksigen reaktif (Reactive Oxygen Species/ROS), sehingga memicu stres oksidatif, kerusakan protein, dan kerusakan DNA. Dampak kesehatan akibat paparan kromium heksavalen meliputi gangguan saluran pencernaan, iritasi dan ulserasi lambung, kerusakan hati dan ginjal, gangguan sistem pernapasan, serta gangguan kulit. Paparan jangka panjang CrVI juga dikaitkan dengan peningkatan risiko kanker, khususnya kanker paru-paru dan saluran pencernaan, sehingga CrVI diklasifikasikan sebagai karsinogen pada manusia (Jacobs et al., 2004).

Paparan logam berat Pb dan CrVI melalui air minum menjadi masalah kesehatan lingkungan yang serius, terutama pada masyarakat yang mengonsumsi air dari sumber yang tidak memenuhi standar kualitas air minum. Paparan jangka panjang, meskipun dalam konsentrasi rendah, dapat menimbulkan efek non-karsinogenik maupun karsinogenik yang bersifat kronis dan sulit dipulihkan. Oleh karena itu, pemantauan kualitas air minum, pengendalian sumber pencemaran, serta penerapan analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL) menjadi langkah penting untuk menilai tingkat risiko dan melindungi masyarakat dari dampak buruk paparan logam berat tersebut.

1.3 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah seberapa besar tingkat risiko paparan logam berat Timbal (Pb) dan Kromium Heksavalen (CrVI) pada Depot Air Minum Isi Ulang (DAMIU) di Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan.

1.4 Tujuan Penelitian

1.4.1. Tujuan Umum

Menganalisis risiko kesehatan lingkungan paparan logam berat Timbal (Pb) dan Kromium Heksavalen (CrVI) pada Depot Air Minum Isi Ulang (DAMIU) di Kecamatan Bungoro Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan.

1.4.2. Tujuan Khusus

- a. Mengetahui gambaran karakteristik responden (umur, berat badan, dan jenis kelamin)
- b. Menganalisis kadar konsentrasi Timbal (Pb) dan Kromium Heksavalen (CrVI) pada air minum yang dikonsumsi masyarakat Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan dari Depot Air Minum Isi Ulang (DAMIU)
- c. Menganalisis karakteristik risiko akibat pajanan Timbal (Pb) dan Kromium Heksavalen (CrVI) pada air minum yang dikonsumsi masyarakat Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan dari Depot Air Minum Isi Ulang (DAMIU)

1.5 Manfaat Penelitian

1. Manfaat Ilmiah

Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah berupa informasi mengenai karakteristik konsentrasi logam berat Timbal (Pb) dan Kromium Heksavalen (CrVI) pada air minum yang digunakan masyarakat Kecamatan Bungoro di sekitar kawasan industri PT. Semen X, serta gambaran tingkat risiko kesehatan yang ditimbulkan. Informasi tersebut dapat menjadi dasar pengembangan kajian Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan, khususnya dalam perumusan upaya manajemen risiko dan komunikasi risiko guna meminimalkan dampak kesehatan masyarakat.

2. Manfaat Institusi

Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi bahan masukan bagi Pemerintah dan Masyarakat Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan dalam rangka peningkatan kualitas kesehatan. Serta diharapkan dapat menjadi bahan referensi dan bahan bacaan yang diharapkan bermanfaat dalam menambah pengetahuan mahasiswa FKM Unhas.

3. Manfaat Praktis

Menambah wawasan dan pengalaman bagi pembaca. Selain itu penelitian ini merupakan salah satu syarat kelulusan di bagian departemen Kesehatan Lingkungan Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin.

4. Manfaat Untuk Penulis

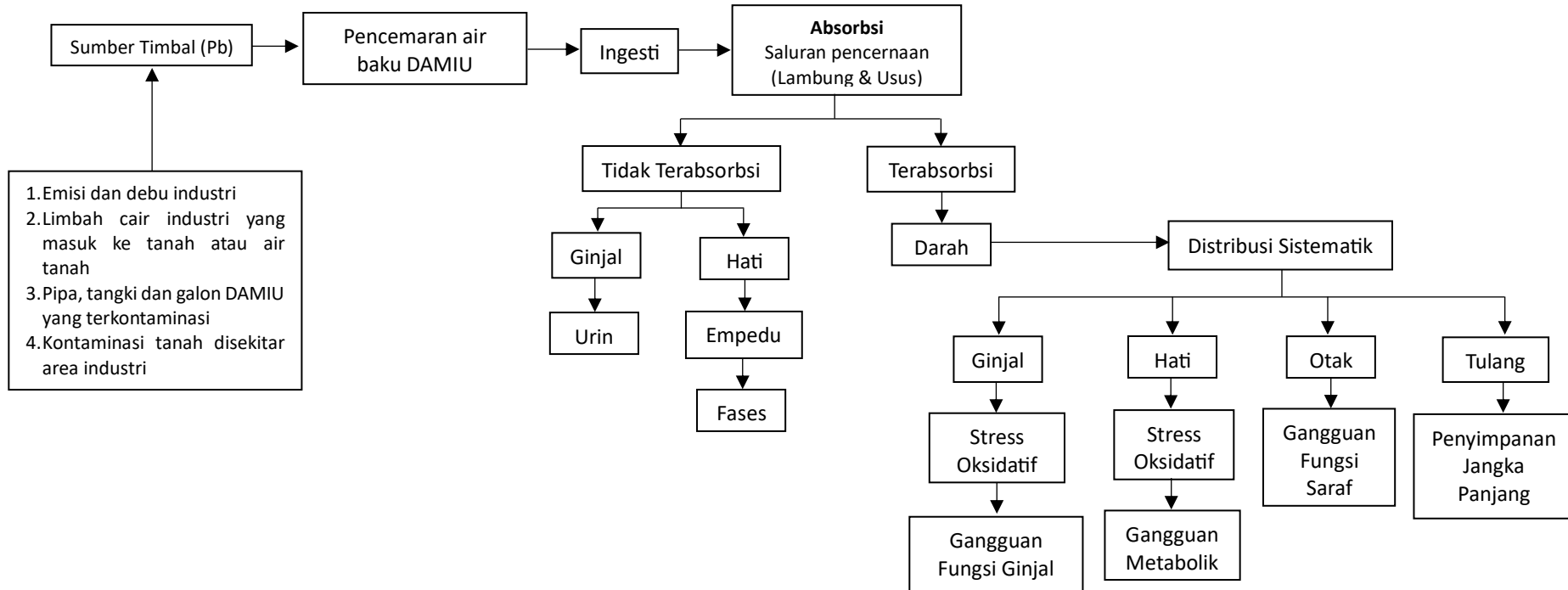
Hasil penelitian ini merupakan pengalaman berharga bagi peneliti dalam mengaplikasikan ilmu yang diperoleh selama mengikuti pendidikan serta memperluas wawasan pengetahuan tentang risiko kesehatan lingkungan akibat pencemaran logam berat pada sumber air.

1.6 Kerangka Teori

6

a. Timbal (Pb)

Penulis menggambarkan tentang alur paparan Timbal (Pb) dari sumber pencemaran hingga munculnya dampak kesehatan pada masyarakat di sekitar kawasan industri yang dituliskan pada tinjauan pustaka kedalam bagan kerangka teori yang disajikan pada Gambar 1.1 dibawah ini:



Gambar 1.1 Mekanisme Paparan Timbal (Pb) Melalui Air Minum Isi Ulang

Kerangka teori pada Gambar 1.1 menggambarkan mekanisme paparan logam berat timbal (Pb) yang berasal dari aktivitas industri hingga menimbulkan dampak kesehatan pada masyarakat melalui media air minum isi ulang (DAMIU). Sumber pencemaran Pb di lingkungan industri meliputi emisi dan debu industri, limbah cair industri yang meresap ke tanah dan mencemari air tanah, penggunaan pipa, tangki, dan galon DAMIU yang terkontaminasi Pb, serta kontaminasi tanah di sekitar kawasan industri. Berbagai sumber tersebut berkontribusi terhadap pencemaran air baku DAMIU yang digunakan sebagai air minum oleh masyarakat.

Air baku DAMIU yang telah terkontaminasi Pb kemudian masuk ke dalam tubuh manusia melalui jalur ingestasi. Setelah tertelan, Pb mengalami proses absorpsi di saluran pencernaan, terutama di lambung dan usus. Proses absorpsi ini dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti kondisi saluran cerna, status gizi, serta bentuk kimia Pb. Sebagian Pb tidak terabsorpsi oleh tubuh dan akan dieliminasi melalui mekanisme ekskresi, yaitu dikeluarkan oleh ginjal dalam bentuk urin serta oleh hati melalui empedu yang selanjutnya dikeluarkan bersama feses.

Pb yang berhasil terabsorpsi akan masuk ke dalam aliran darah dan mengalami distribusi sistematis ke berbagai organ target. Organ utama yang menjadi tempat distribusi Pb meliputi ginjal, hati, otak, dan tulang. Distribusi ini terjadi karena Pb memiliki kemampuan berikatan dengan protein darah dan jaringan tubuh.

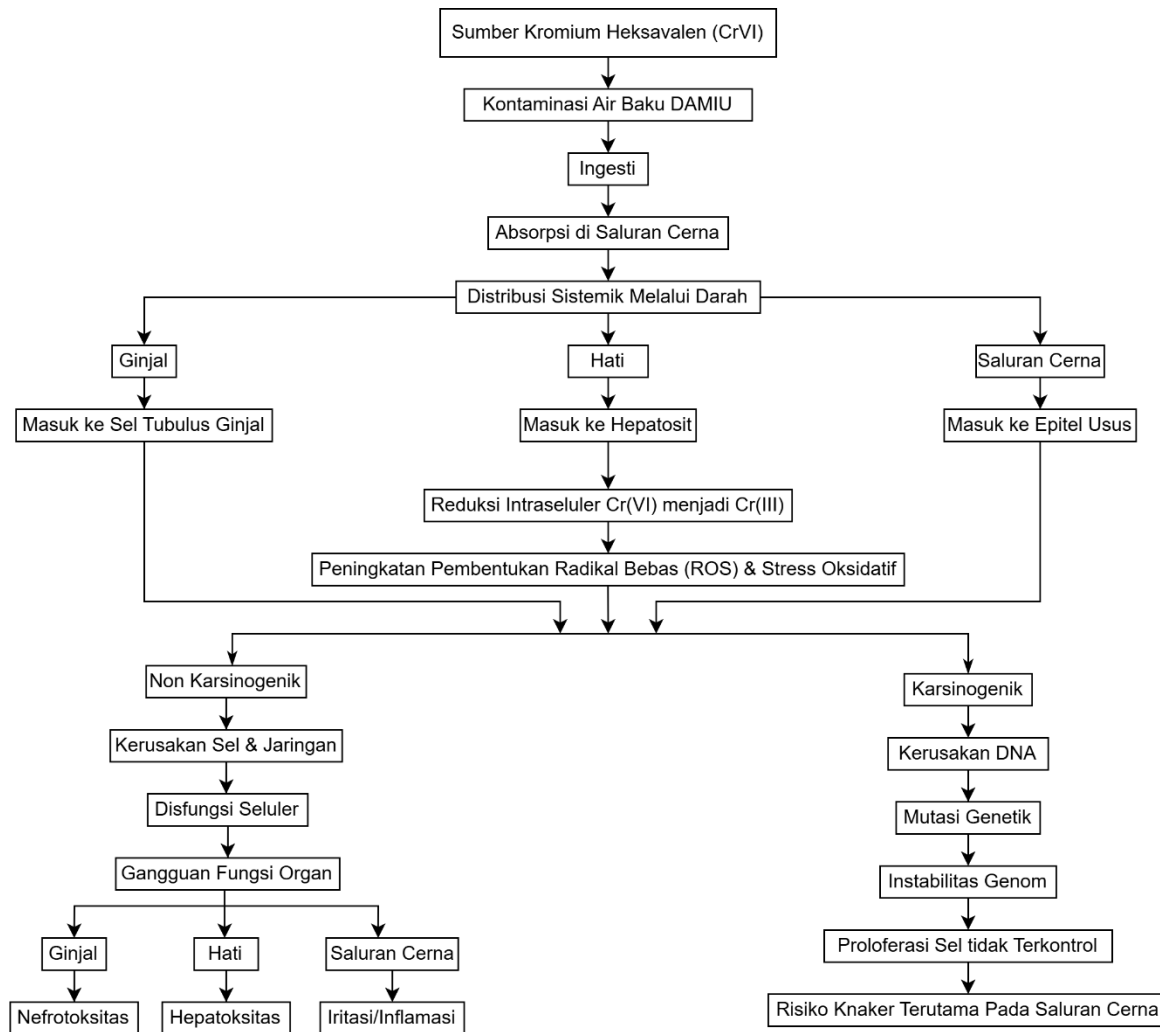
Di ginjal, Pb terakumulasi terutama pada sel-sel tubulus ginjal dan memicu terjadinya stres oksidatif. Kondisi ini menyebabkan kerusakan sel ginjal yang berujung pada gangguan fungsi ginjal, seperti penurunan kemampuan filtrasi dan ekskresi zat sisa. Pada hati, Pb yang terdistribusi ke sel hepatosit juga memicu stres oksidatif dan mengganggu proses metabolisme, sehingga dapat menyebabkan gangguan metabolik dan penurunan fungsi detoksifikasi hati.

Selain itu, Pb yang mencapai sistem saraf pusat, khususnya otak, dapat mengganggu fungsi saraf. Pb mampu mengganggu transmisi impuls saraf dan keseimbangan neurotransmitter, sehingga berpotensi menimbulkan gangguan fungsi saraf, termasuk gangguan kognitif dan neurologis. Pb juga memiliki afinitas tinggi terhadap jaringan keras, sehingga dapat terakumulasi dalam tulang. Penyimpanan Pb di tulang bersifat jangka panjang dan dapat bertindak sebagai sumber paparan internal kronis, karena Pb dapat dilepaskan kembali ke dalam darah pada kondisi tertentu, seperti kehamilan, penuaan, atau gangguan metabolisme kalsium.

Secara keseluruhan, kerangka teori ini menunjukkan bahwa paparan Pb melalui air minum isi ulang tidak hanya bergantung pada sumber pencemaran, tetapi juga melibatkan proses toksikokinetik yang kompleks, meliputi absorpsi, distribusi, dan ekskresi. Akumulasi Pb pada organ target dapat memicu stres oksidatif dan gangguan fungsi organ, sehingga berpotensi menimbulkan dampak kesehatan jangka pendek maupun jangka panjang pada masyarakat yang terpapar secara kronis.

b. Kromium Heksavalen (CrVI)

Penulis menggambarkan tentang alur paparan Kromium Heksavalen (CrVI) dari sumber pencemaran hingga munculnya dampak kesehatan pada masyarakat sekitar kawasan industri yang dituliskan pada tinjauan pustaka kedalam bagan kerangka teori yang disajikan pada Gambar 1.2 dibawah ini:



Gambar 1.2 Mekanisme Paparan Kromium Heksavalen (CrVI) Melalui Air Minum Isi Ulang

Kerangka teori pada Gambar 1.2 menjelaskan mekanisme paparan Kromium Heksavalen (CrVI) yang bersumber dari aktivitas industri hingga menimbulkan dampak kesehatan pada masyarakat yang mengonsumsi air minum isi ulang (DAMIU) di sekitar kawasan industri. Sumber utama pencemaran CrVI di lingkungan berasal dari emisi dan debu industri, limbah cair industri yang meresap ke dalam tanah dan mencemari air tanah, serta penggunaan pipa, tangki penyimpanan, dan galon DAMIU yang berpotensi mengalami kontaminasi logam berat. Selain itu, aktivitas masyarakat di sekitar kawasan industri dapat mempercepat proses penyebaran CrVI di lingkungan, sehingga meningkatkan risiko kontaminasi air baku DAMIU.

CrVI yang mencemari air baku DAMIU kemudian masuk ke dalam tubuh manusia melalui jalur ingestasi. Setelah tertelan, CrVI diserap di saluran pencernaan, terutama pada usus, dan selanjutnya masuk ke dalam peredaran darah. Melalui aliran darah, CrVI terdistribusi secara sistemik ke berbagai organ target utama, yaitu ginjal, hati, dan saluran cerna. Distribusi ini terjadi karena CrVI memiliki sifat mudah larut dan mampu menembus membran sel melalui sistem transport anion.

Pada tingkat organ, CrVI masuk ke dalam sel target dengan mekanisme yang spesifik. Di ginjal, CrVI terakumulasi pada sel-sel tubulus ginjal; di hati, CrVI masuk ke dalam sel hepatosit; sedangkan di saluran cerna, CrVI menembus sel epitel usus. Di dalam sel-sel tersebut, Cr(VI) mengalami proses reduksi intraseluler bertahap menjadi Cr(V), Cr(IV), hingga akhirnya menjadi Cr(III). Proses reduksi ini berlangsung melalui reaksi dengan molekul intraseluler seperti glutathione, asam askorbat, dan protein seluler. Reduksi intraseluler Cr(VI) menjadi Cr(III) merupakan tahap kunci dalam mekanisme toksisitas CrVI, karena selama proses tersebut terbentuk radikal bebas atau reactive oxygen species (ROS) dalam jumlah berlebihan. Peningkatan ROS menyebabkan terjadinya stres oksidatif, yang ditandai dengan ketidakseimbangan antara produksi radikal bebas dan kapasitas antioksidan sel. Stres oksidatif ini berperan penting dalam memicu kerusakan komponen seluler, termasuk lipid membran, protein, dan asam nukleat.

Pada jalur non-karsinogenik, stres oksidatif yang ditimbulkan oleh CrVI menyebabkan kerusakan sel dan jaringan, yang kemudian berkembang menjadi disfungsi seluler dan gangguan fungsi organ. Dampak kesehatan yang muncul bersifat spesifik pada organ target. Pada ginjal, kerusakan sel tubulus dapat menyebabkan nefrotoksisitas yang ditandai dengan gangguan fungsi filtrasi dan ekskresi. Pada hati, kerusakan hepatosit dapat menimbulkan hepatotoksisitas dan gangguan metabolisme. Sementara itu, pada saluran cerna, pajanan CrVI dapat menyebabkan iritasi dan inflamasi mukosa usus.

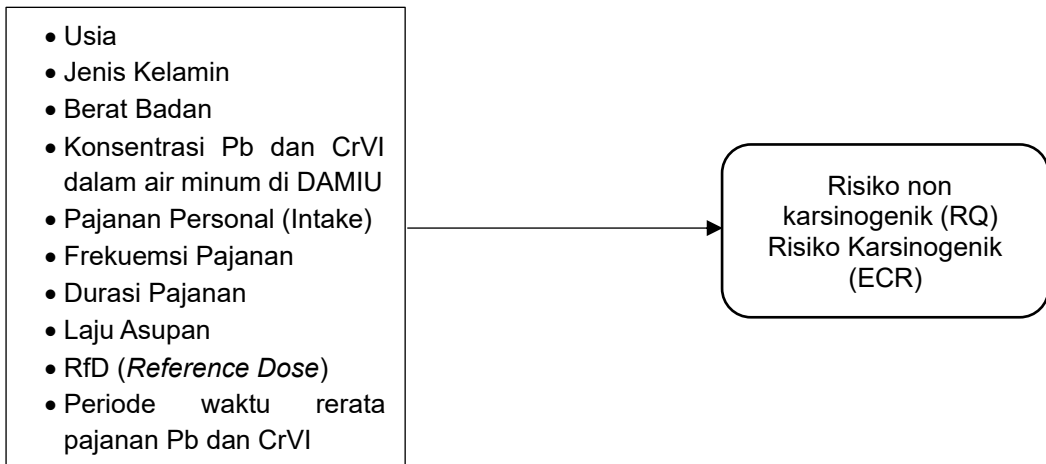
Selain jalur non-karsinogenik, CrVI juga memiliki potensi karsinogenik. Pada jalur karsinogenik, stres oksidatif yang berkepanjangan serta interaksi Cr(III) dengan materi genetik sel menyebabkan terjadinya kerusakan DNA. Kerusakan DNA yang tidak diperbaiki secara sempurna dapat berkembang menjadi mutasi genetik dan instabilitas genom. Kondisi ini selanjutnya memicu proliferasi sel yang tidak terkontrol, yang merupakan tahap awal proses karsinogenesis. Risiko kanker terutama meningkat pada saluran cerna, mengingat jalur ini merupakan rute utama masuknya CrVI melalui air minum.

Secara keseluruhan, kerangka teori ini menunjukkan hubungan yang sistematis antara sumber pencemaran CrVI, jalur pajanan melalui air minum isi ulang, proses absorpsi dan

distribusi dalam tubuh, mekanisme toksikodinamik berupa stres oksidatif dan kerusakan sel, hingga munculnya dampak kesehatan non-karsinogenik dan karsinogenik pada masyarakat di sekitar kawasan industri.

1.7 Kerangka Konsep

Hubungan antara variabel independen dan variabel dependen dalam penelitian ini digambarkan pada Gambar 1.3 berikut:



Keterangan :

: Variabel Independen

: Variabel Dependen

Gambar 1.3 Kerangka Konsep

Pada Gambar 1.3 ditunjukkan bahwa variabel independen berupa usia, jenis kelamin, berat badan, serta parameter paparan seperti konsentrasi Pb dan CrVI dalam air DAMIU, intake, frekuensi dan durasi paparan, laju asupan, serta periode waktu rerata paparan, berperan menentukan besar kecilnya paparan yang diterima masyarakat di Kecamatan Bungoro. Seluruh variabel tersebut mempengaruhi risiko yang dihitung menggunakan pendekatan ARKL. Nilai risiko ini kemudian menjadi dasar untuk menentukan risiko non-karsinogenik (RQ) dan risiko karsinogenik (ECR) sebagai variabel dependen dalam penelitian ini

1.8 Definisi Operasional

Tabel 1.1 Definisi Operasional dan Kriteria Objektif

No	Variabel	Definisi	Alat Ukur	Cara Ukur	Satuan	Skala Ukur
1	Usia	Lamanya waktu yang dilewati oleh responden pada saat dilakukan wawancara terhitung sejak responden lahir hingga penelitian dilakukan	Kuesioner	Wawancara	Tahun	Rasio
2	Jenis Kelamin	Berkaitan dengan perbedaan organ biologis sejak responden lahir yang terbagi menjadi dua yaitu, laki-laki dan perempuan.	Kuesioner	Wawancara	1. Laki-laki 2. Perempuan	Nominal
3	Berat Badan (Wb)	Berat badan responden yang diukur pada saat pengukuran langsung atau observasi dilakukan	Timbangan	Menimbang berat badan	kg	Rasio
4	Konsentrasi Timbal (Pb)	Kandungan timbal (Pb) pada DAMIU yang berada di kecamatan Bungoro	<i>Automatic Absorption Spectrophotometer (AAS)</i>	Pengukuran laboratorium	mg/L	Rasio
5	Konsentrasi Kromium (CrVI)	Kandungan kromium (CrVI) pada DAMIU yang berada di kecamatan Bungoro	<i>Spektrofotometri</i>	Pengukuran laboratorium	mg/L	Rasio
6	Reference Dose (RfD)	Dosis acuan yang menunjukkan jumlah maksimum suatu zat kimia yang dapat masuk ke dalam tubuh manusia secara terus-menerus tanpa menimbulkan efek kesehatan yang merugikan	-	Nilai RfD di ambil dari literatur resmi	mg/kg/hari	Rasio

No	Variabel	Definisi	Alat Ukur	Cara Ukur	Satuan	Skala Ukur
7	Pajanan Personal (Intake)	Estimasi Timbal dan Kromium yang masuk kedalam tubuh responden melalui pajanan oral.	<i>Exposure Assesment</i>	CDI Oral = $\frac{CW \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT}$ (Mallongi,2023)	mg/kg/hari	Rasio
8	Frekuensi pajanan/ f_E (frequency of exposure)	Jumlah hari mengonsumsi air minum yang mengandung Pb dan CrVI per tahun	Kuesioner	Wawancara	hari/tahun	Rasio
9	Laju asupan air minum/ R (rate)	Banyaknya air yang dikonsumsi oleh masyarakat dalam satuan liter perhari	Kuesioner	Wawancara dan menggunakan referensi buku	L/hari	Rasio
10	Durasi pajanan/ Dt (duration time)	Lamanya waktu mengonsumsi air minum yang mengandung Pb dan CrVI di lokasi penelitian dalam tahun	Kuesioner	Wawancara	Tahun	Rasio
11	Tingkat risiko non-karsinogenik (RQ)	Besarnya risiko non karsinogenik Pb dan CrVI terhadap masyarakat	Microsoft Excel	Rumus Perhitungan $RQ = \frac{I}{RfD}$ $RQ = \frac{I}{0.004/0.0009}$	-	Rasio
12	Tingkat risiko karsinogenik (ECR)	Besarnya risiko karsinogenik CrVI terhadap masyarakat	Microsoft Excel	Rumus Perhitungan $ECR = Intake \times SF$ $ECR = I \times 0.26$	-	Rasio
13	Periode waktu rata rata (t_{avg})	Periode waktu rata rata untuk efek non karsinogenik atau efek karsinogenik	-	Efek non karsinogenik = 10.950 hari Efek Karsinogenik = 25.550 hari	hari	Rasio

1.9 Tabel Sintesa

Tabel 1.2 Sintesa Artikel Terkait Konsentrasi Logam Timbal (Pb) dan Kromium (Cr)

No	Nama Penulis, Tahun Terbit	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil Penelitian	Kesimpulan
1	Anggraini, W et al., (2024).	A comparative analysis of lead (Pb) and cadmium heavy metals contents in bottled and refilled drinking water in Sukarama District, Bandar Lampung	Untuk mengkaji kandungan logam berat timbal (Pb) dan kadmium (Cd) pada air minum dalam kemasan dan air minum isi ulang	AMDK5, dengan kandungan Pb -0,007 mg/L dan konsentrasi Cd 0,001 mg/L, merupakan salah satu dari lima sampel air minum dalam kemasan dengan kualitas yang dapat diterima. Di sisi lain, kandungan Pb dan Cd dalam empat sampel lainnya melampaui standar maksimum. Kadar Pb dan Cd dalam air minum isi ulang diukur, dan hasilnya beragam. Nilai Pb dalam lima dari dua belas sampel air minum isi ulang melampaui standar maksimum 0,01 mg/L.	Untuk air minum isi ulang, hasil pengukuran menunjukkan variasi kualitas, dengan lima dari dua belas sampel memiliki kadar Pb yang melampaui batas maksimum yang diizinkan, yaitu 0,01 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas air minum isi ulang masih belum konsisten dan perlu pengawasan lebih ketat untuk menjamin keamanannya bagi konsumen.
2	Sofia, R., & Aditya	Analysis of lead content in refillable	Untuk mengetahui kandungan timbal pada	Terdapat 96,97% AMIU yang memenuhi persyaratan Menteri	mayoritas AMIU telah memenuhi standar, pengawasan dan kontrol

No	Nama Penulis, Tahun Terbit	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil Penelitian	Kesimpulan
	Fajar Perkasa, K. Z. (2022)	drinking water in lhokseumawe city	depot air minum isi ulang di kota lhokseumawe	Kesehatan Republik Indonesia dengan rata-rata kadar timbal $0,003 \pm 0,004$ mg/L. Namun masih terdapat 2 (dua) AMIU yang melebihi kadar timbal yaitu 0,012 mg/L dan 0,011 mg/L	kualitas tetap diperlukan untuk memastikan konsistensi dan keamanan air minum isi ulang bagi konsumen.
3	Fahimah, N., Salami, I. R. S., Oginawati, K., & Mubiarto, H. (2024)	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	Untuk menganalisis sampel air untuk keperluan hygiene dan sanitasi	6% air tanah untuk keperluan higiene dan sanitasi dan 13% air minum (7,8% air tanah, 5,2% air isi ulang) dinilai tidak layak pakai karena konsentrasi logam berat tertentu yang tinggi melampaui batas maksimum. As, Cd, Co, Hg, Mn, dan Pb terdeteksi dalam beberapa sampel air minum yang dinilai tidak layak pakai. Beberapa logam berat yang diduga berasal dari sumber alami adalah Co, Fe, Mn, As, dan Zn, sedangkan Pb, Cd, Hg, dan Co diduga berasal dari sumber antropogenik. Anak-	Paparan non-karsinogenik tidak menunjukkan risiko kesehatan, hal tersebut berbanding terbalik dengan senyawa arsenik melalui jalur minum mampu menimbulkan risiko kesehatan terhadap anak, orang dewasa dan ibu hamil.

No	Nama Penulis, Tahun Terbit	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil Penelitian	Kesimpulan
				anak ditemukan lebih rentan daripada pria dan wanita dewasa. Perkiraan rata-rata tingkat risiko nonkarsinogenik berdasarkan sumber air adalah air isi ulang > air sumur > air hujan > air mata air	
4	Rahmawati, F., & Lumbantobing, R. (2023)	Analysis of Drinking Water Quality Directly Related to Health at Refill Depots in the South Bekasi Area, Indonesia	Untuk menganalisis parameter mikrobiologi dan kimia anorganik pada beberapa sumber air minum dari depot air di wilayah Kota Tangerang Selatan, Indonesia	tiga sampel air minum mengandung bakteri <i>E.coli</i> , dan lima sampel air minum mengandung <i>Pseudomonas</i> sp. Analisis kimia anorganik menunjukkan bahwa semua sampel mengandung senyawa kimia anorganik (Ar, F, Cr, Cd, NO ₂ , NO ₃ , CN, Se) dengan konsentrasi di bawah batas maksimal yang diizinkan oleh Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia	air minum yang terkontaminasi bakteri <i>E. coli</i> dan lima sampel yang mengandung <i>Pseudomonas</i> sp., mengindikasikan adanya risiko mikrobiologis pada beberapa sampel air minum. Namun, hasil analisis kimia anorganik menunjukkan bahwa semua sampel mengandung senyawa kimia anorganik, seperti Ar, F, Cr, Cd, NO ₂ , NO ₃ , CN, dan Se, dengan konsentrasi yang berada di bawah batas maksimum yang diizinkan oleh

No	Nama Penulis, Tahun Terbit	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil Penelitian	Kesimpulan
					Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia. Dengan demikian, meskipun kandungan kimia anorganik pada sampel aman, pengawasan terhadap kualitas mikrobiologis perlu ditingkatkan untuk menjamin keamanan air minum.
5	Rahmi, A., Yulia, R., Husna, A., & Amir, A. (2021)	Assessment of microbial and level of Cadmium, Chromium and Lead contamination on drinking water refilling station in Bungus Teluk Kabung, West Sumatera, Indonesia	Mengkaji tingkat cemaran mikroba dan kadar beberapa logam berat (kadmium, kromium, dan timbal) pada air minum isi ulang dari SPBU Bungus Teluk Kabung Sumatera Barat, Indonesia	Semua sampel terdeteksi kadmium, kromium, dan timbal. Namun, tidak ada satu pun yang kadarnya melebihi batas maksimum yang diizinkan berdasarkan nilai pedoman pada Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia nomor 492/MENKES/PER/IV/2010. Timbal ditemukan paling tinggi pada sampel B, kemudian diikuti oleh kromium pada sampel A	kadar ketiga logam tersebut tidak ada yang melebihi batas maksimum yang diizinkan menurut Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia nomor 492/MENKES/PER/IV/2010. Dari ketiga logam tersebut, timbal ditemukan dalam jumlah tertinggi pada sampel B, diikuti oleh kromium yang paling tinggi pada sampel A, dengan nilai masing-masing 0,367 ppb dan 0,143 ppb.

No	Nama Penulis, Tahun Terbit	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil Penelitian	Kesimpulan
				dengan nilai masing-masing 0,367 ppb dan 0,143 ppb.	
6	Sari, I., & Veronneca, R. (2023)	Differences in Iron (Fe) Content in Samples of Refill Drinking Water (AMIU) and Bottled Drinking Water (AMDK) Atomic Absorption Spectrophotometry Method	Untuk mengetahui perbedaan kadar besi pada sampel air minum isi ulang dan air minum dalam kemasan metode spektrofotometri serapan atom	Nilai rata-rata kadar besi (Fe) pada sampel air minum isi ulang 7,7 mg/L dan air minum dalam kemasan 3,7 mg/L metode Spektrofotometri Serapan Atom. Uji Mann Whitney memperoleh nilai p (Sig 2 Tailed) = 0,04	Kesimpulan dalam penelitian menjelaskan bahwa air minum isi ulang lebih tinggi kadar Fe dibandingkan air kemasan.
7	Pulungan, A. F., & Wahyuni, S. (2021)	Analisis kandungan logam kadmium (cd) dalam air minum isi ulang (amiu) di kota lhokseumawe, aceh	Untuk menganalisis kandungan logam berat cadmium dalam air minum isi ulang	Nilai maksimum kadar Cd adalah 0,004 mg/l serta nilai minimum yang didapat adalah 0,001 mg/l. Rerata kadar Cd adalah $0,0019 \pm 0,00072$ mg/l dan masih dalam batas yang ditetapkan. Namun, terdapat 1 (satu) AMIU melebihi ambang batas kadar kadmium yaitu 0,004 mg/l	Disimpulkan bahwa kadar Cd di beberapa MIU masih di batas normal, sedangkan ada 1 AMIU yang memiliki kadar Cd yang melampaui batas dan itu merupakan hal yang dapat mengganggu kesehatan
8	Wati, P. A., Priyanto, A. D., Silaban, Y. F., &	Qualitative Analysis of Water Contents in The	Untuk menganalisis kualitas air minum dari	Hasil analisis DAMIU Desa Giripurno yang bersumber dari Mata Air Kijan sesuai	DAMIU desa giripumo bebas dari bahan logam berbahaya selain dari

No	Nama Penulis, Tahun Terbit	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil Penelitian	Kesimpulan
	Ganendra, D. P. (2022)	Refill Drinking Water Depot Of Giripurno Village, Bumiaji, Batu	segi fisik, kimia dan bakteriologis	dengan PERMENKES RI Nomor 492/MENKES/PER/IV/2010 kecuali kadar Coliform, sehingga perlu dilakukan penelitian lebih lanjut untuk menghilangkan kadar Coliform yang berlebih.	coliform sehingga harus ditinjau lebih lanjut.
9	Wanidia Utami, E. E. (2022)	Penentuan kadar logam berat timbal (Pb) dan tembaga (Cu) pada air minum isi ulang di daerah pesisir selat Bali Kabupaten Banyuwangi menggunakan spektrometer emisi atom inductively coupled plasma optical emission spectrometric (ICP-OES)	Untuk mengetahui kelayakan air minum berdasarkan Permenkas Tahun 2010 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum, khususnya logam Cu dan Pb	Logam berat tembaga berkisar 0.0099 mg/L sampai dengan 0.0489 mg/L dan kadar timbal berkisar antara 0.0019 mg/L sampai dengan 0.0067 mg/L, maka dari itu air minum tersebut masih memenuhi persyaratan Permenkes No. 429 Tahun 2010 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum	Dengan demikian, air minum tersebut masih memenuhi persyaratan kualitas yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Kesehatan No. 429 Tahun 2010 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum.

No	Nama Penulis, Tahun Terbit	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil Penelitian	Kesimpulan
10	Amelia, F. (2021)	Analisa logam berat dalam air minum isi ulang (amiu) yang beredar di kota batam	Untuk menganalisis dan menentukan kadar kandungan logam yang terdapat pada air minum isi ulang yang beredar di Kota Batam	Kadar logam Cu, Cd, dan Pb pada 6 depot air minum isi ulang tersebut berada di bawah baku mutu yang telah ditetapkan berdasarkan SNI dan peraturan Menteri Kesehatan No. 492/Menkes/Per/IV/2010. Sehingga air minum isi ulang tersebut layak untuk dikonsumsi	Kesimpulan dari hasil penelitian ini adalah bahwa kadar logam tembaga (Cu), kadmium (Cd), dan timbal (Pb) pada enam depot air minum isi ulang yang diuji berada di bawah baku mutu yang telah ditetapkan berdasarkan SNI dan Peraturan Menteri Kesehatan No. 492/Menkes/Per/IV/2010. Oleh karena itu, air minum isi ulang tersebut layak untuk dikonsumsi.
11	Auza, M. (2022)	Analisis Kadar Logam Besi (Fe) pada Air Minum Isi Ulang di Desa Sunggal Kanan, Kabupaten Deli Serdang dengan Metode Spektrofotometri Serapan Atom (Ssa)	Untuk mengetahui kadar logam besi (Fe) pada air minum isi ulang yang terdapat di Desa Sunggal Kanan, Kabupaten Deli Serdang sesuai persyaratan Peraturan Menteri Kesehatan RI No.492/MENKES/PER/VI/2010	Kandungan Fe dalam air minum isi ulang dari Depot I diperoleh kadar besi (Fe) sebenarnya terletak antara 0,2745 – 0,3363 mg/L, kandungan Fe dalam air minum isi ulang dari depot II diperoleh kadar besi (Fe) sebenarnya terletak antara 0,1555 – 0,2074 mg/L, dan kandungan Fe dalam air	Dari semua depot yang dijadikan sampel, semua depot memiliki hasil yang berbeda dan tidak ada yang melampaui batas.

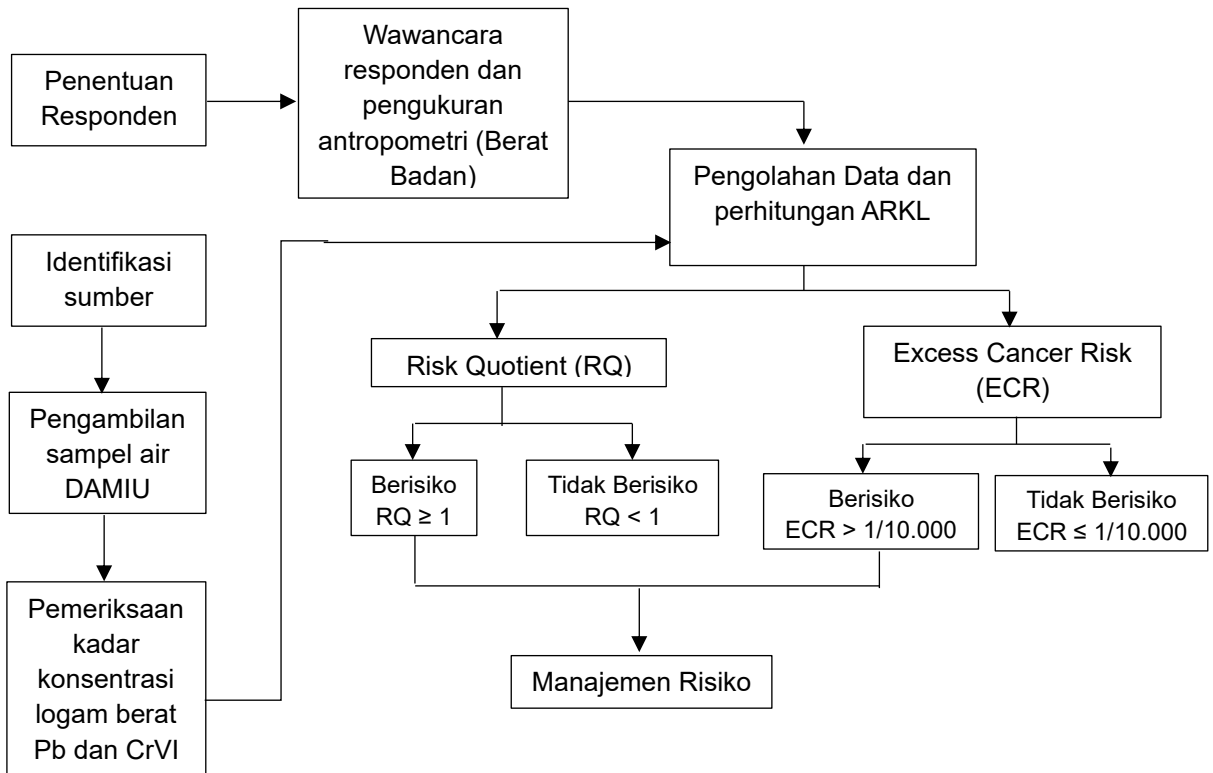
No	Nama Penulis, Tahun Terbit	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil Penelitian	Kesimpulan
				minum isi ulang dari depot III kadar besi (Fe) sebenarnya terletak antara 0,0688 – 0,0903 mg/L.	
12	Marhamah, A. N., & Santoso, B. (2020)	Kualitas air minum isi ulang pada depot air minum di Kabupaten Manokwari Selatan	Untuk mengetahui kualitas air minum isi ulang yang diproduksi oleh depot air minum isi ulang di Kabupaten Manokwari Selatan berdasarkan variabel fisika, kimia dan mikrobiologi	Kualitas air minum isi ulang di depot B, D, dan F memenuhi syarat baku mutu berdasarkan Permenkes 2010. Populasi bakteri <i>E. coli</i> yang terkandung dalam air minum isi ulang di depot A, C, dan F setelah disimpan dalam galon selama 3 hari berada di atas baku mutu sehingga harus direbus sebelum dikonsumsi manusia	kualitas air minum isi ulang di Depot B, D, dan F memenuhi syarat baku mutu berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan 2010. Namun, populasi bakteri <i>E. coli</i> yang terkandung dalam air minum isi ulang di Depot A, C, dan F setelah disimpan dalam galon selama 3 hari melebihi baku mutu, sehingga air tersebut harus direbus terlebih dahulu sebelum dikonsumsi manusia.
13	Toalu, A., Baharuddin, B., & Nurhartati, A. (2023)	Analisis Kualitas Depot Air Minum Isi Ulang Yang Ada Di Wilayah Puskesmas Tamalanrea	Untuk mengetahui layak atau tidaknya kualitas air minum yang dihasilkan Depot Air Minum Isi Ulang di wilayah kerja Puskesmas Tamalanrea	Parameter fisika dapat dilakukan dengan melihat dan mengamati secara langsung apakah air tersebut berwarna, berbau, berasa atau tidak. Untuk uji kimia sampel dilakukan	Kesimpulan dari hasil penelitian ini adalah bahwa parameter fisika kualitas air dapat dinilai dengan cara mengamati langsung apakah air tersebut memiliki warna, bau, atau rasa.

No	Nama Penulis, Tahun Terbit	Judul Penelitian	Tujuan Penelitian	Hasil Penelitian	Kesimpulan
				dengan metode UV-Vis, parameter mikrobiologi (<i>Escherichia Coli</i>) atau jumlah <i>Escherichia Coli</i> dalam sampel.	Untuk uji kimia, sampel dianalisis menggunakan metode UV-Vis. Sementara itu, parameter mikrobiologi yang diuji adalah jumlah bakteri <i>Escherichia coli</i> dalam sampel air, yang menjadi indikator penting dalam menentukan kelayakan air untuk dikonsumsi.
14	Suhesty, A. D. (2021)	Analisis mikrobiologi, fisika dan kimia air minum isi ulang dari depot di kampung baru, kedaton, bandar lampung	Untuk mengetahui keberadaan cemaran mikroba <i>E. coli</i> dan koliform serta mengetahui kualitas air minum isi ulang secara fisika dan kimia pada depot air minum isi ulang di Kampung Baru Kecamatan Kedaton Kota Bandar Lampung	Air minum yang diproduksi terdapat 7 depot dengan nilai koliform 0/100 ml sampel dan 1 depot dengan nilai koliform 3.0/100 ml sampel. parameter fisika TDS memiliki nilai berkisar 82-157 mg/L, parameter suhu memiliki nilai $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Parameter kimia pH untuk 7 depot memiliki nilai berkisar 6,6 – 7,3 dan 1 depot memiliki nilai pH = 6,1	Kesimpulan dari hasil penelitian ini adalah bahwa sebagian besar depot air minum yang diproduksi memenuhi standar mikrobiologi. Secara keseluruhan, kualitas air minum yang diproduksi pada depot-depot tersebut sebagian besar memenuhi standar yang ditetapkan.

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan sesuai dengan diagram alir pada gambar 2.1 berikut ini:



Gambar 2.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan identifikasi potensi sumber pencemaran logam berat Pb dan CrVI pada Depot Air Minum Isi Ulang (DAMIU) di Kecamatan Bungoro, diikuti pengambilan sampel air dan analisis laboratorium untuk menentukan konsentrasi keduanya. Responden dipilih sesuai kriteria inklusi untuk memperoleh data antropometri dan parameter paparan melalui wawancara. Seluruh hasil pengujian selanjutnya dianalisis menggunakan pendekatan Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL), dengan penentuan risiko non-karsinogenik melalui nilai Risk Quotient (RQ) dan risiko karsinogenik melalui Excess Cancer Risk (ECR). Nilai $RQ < 1$ dan $ECR \leq 1 \times 10^{-4}$ menunjukkan bahwa risiko kesehatan dapat diterima, sedangkan $RQ \geq 1$ atau $ECR > 1 \times 10^{-4}$ menunjukkan adanya potensi dampak kesehatan yang memerlukan manajemen risiko.

2.2 Pendekatan dan Jenis Penelitian

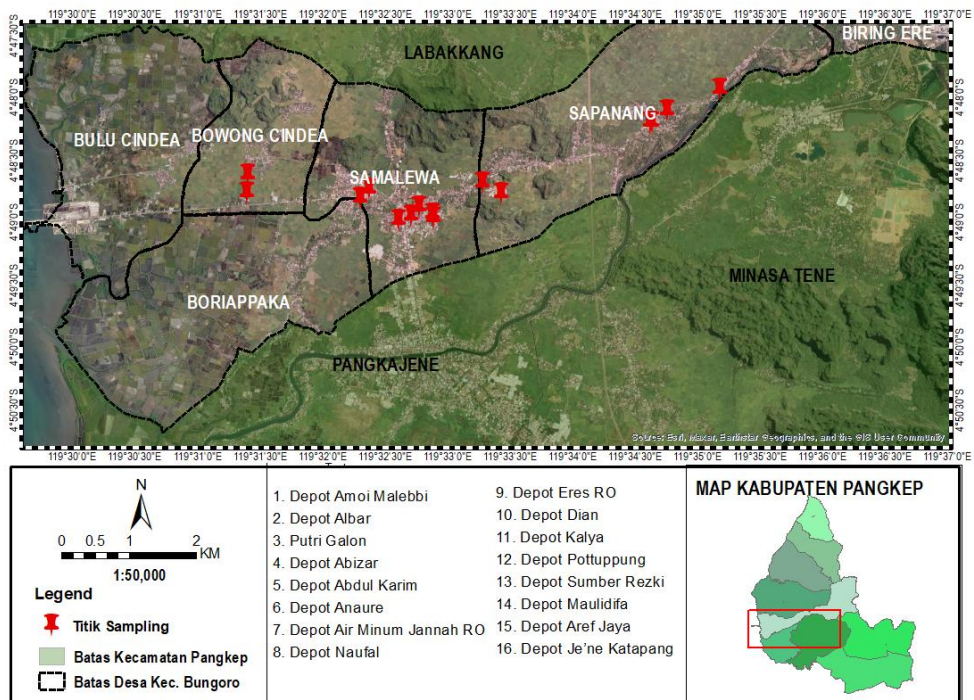
Desain studi dalam penelitian ini menggunakan metode Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL). Penelitian dengan menggunakan metode analisis risiko kesehatan lingkungan bertujuan untuk menghitung tingkat risiko gangguan kesehatan yang terjadi pada masyarakat yang tinggal di Kecamatan Bungoro.

Prosedur penelitian yang digunakan dalam metode Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan meliputi langkah-langkah sebagai berikut yaitu :

1. Identifikasi Bahaya (*Hazard Identification*)
2. Analisis Dosis Respon (*Dose – Respon Assesment*)
3. Analisis Pemajanan (*Exposure Assessment*)
4. Karakteristik Risiko (*Risk Characteristic*)
5. Manajemen Risiko

2.3 Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian berada di Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan. Kegiatan penelitian dilaksanakan Februari 2025 – April 2025. Alasan pemilihan lokasi penelitian didasarkan karena di Kecamatan Bungoro terdapat Industri semen yang memiliki potensi untuk menghasilkan limbah partikel, gas berbahaya, dan debu yang dapat mencemari lingkungan sekitar. DAMIU sering menjadi sumber utama penyediaan air bersih bagi masyarakat setempat. Hal ini dapat mempengaruhi sumber air lokal atau peralatan yang digunakan dalam proses pengolahan DAMIU sekitar kawasan industri.



Gambar 2. 2 Peta Lokasi Sampling

2.4 Populasi dan Sampel

2.3.1 Populasi

a. Populasi Manusia

Populasi dalam penelitian ini adalah masyarakat yang berisiko terpapar Timbal (Pb) dan Kromium Heksavalen (CrVI) sebanyak 30.681 jiwa penduduk Kecamatan Bungoro Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan.

b. Populasi Lingkungan

Populasi lingkungan dalam penelitian ini adalah sebanyak 26 DAMIU yang berada di Kecamatan Bungoro Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan

2.3.2 Teknik Pengambilan Sampel

a. Sampel Manusia (Responden)

Pengambilan sampel dalam penelitian ini dilakukan dengan teknik *purposive sampling*, yaitu pemilihan responden berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi tertentu. Kriteria tersebut meliputi:

1. Kriteria inklusi:

Kriteria Inklusi merupakan kriteria yang apabila terpenuhi maka dapat dijadikan sebagai sampel penelitian. Kriteria inklusi penelitian ini adalah:

- Responden yang berdomisili di Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan
- Responden yang mengonsumsi air minum dari DAMIU sebagai sumber utama air minum
- DAMIU yang sumber airnya menggunakan air tanah
- Jarak DAMIU minimal 1 km - 50 km dari aktivitas industri PT. Semen X

2. Kriteria eksklusi:

Kriteria Eksklusi merupakan kriteria yang apabila dijumpai maka tidak dapat dijadikan sebagai sampel penelitian. Kriteria eksklusi penelitian ini adalah

- Responden yang tidak bersedia untuk diwawancarai atau memberikan informasi yang diperlukan
- Responden yang memiliki disabilitas sensorik, seperti gangguan pendengaran (tunarungu) dan gangguan penglihatan (tunanetra).

Penentuan ukuran sampel dalam penelitian ini mengacu pada rumus Lemeshow (Lemeshow et al., 1990) sebagai berikut:

$$n = \frac{Z^2 p (1 - p)}{d^2}$$

Keterangan:

n = Besar sampel

Z = 1,96 (tingkat kepercayaan 95%)

p = 0,20 (proporsi populasi berdasarkan estimasi risiko/paparan)

d = 0,12 (margin of error, umum digunakan pada penelitian lapangan ARKL)

Karena populasi penelitian ini adalah 30.681 orang, dilakukan koreksi menggunakan rumus:

$$n_{adj} = \frac{n}{1 + \frac{n-1}{N}}$$

Keterangan:

n_{adj} = Besar sampel setelah koreksi

n = Besar sampel

N = Besar Populasi (30.681)

Berdasarkan hasil perhitungan jumlah sampel, maka didapatkan jumlah sampel sebanyak 44 responden masyarakat Kecamatan Bungoro berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan.

b. Sampel per DAMIU (Alokasi Proporsional)

Setelah jumlah sampel manusia diperoleh, langkah selanjutnya adalah menentukan alokasi jumlah sampel pada setiap DAMIU. Tahap ini menggunakan teknik *Proportionate Stratified Random Sampling*, yaitu pembagian sampel secara proporsional berdasarkan jumlah konsumen pada masing-masing DAMIU. dengan rumus *proportionate stratified random sampling* menurut (Sugiyono, 2013) :

$$\text{Sampel Per DAMIU} = \frac{\text{Jumlah Konsumen Per DAMIU}}{\text{Total Konsumen Keseluruhan}} \times \text{Total Sampel}$$

Berdasarkan total sampel penelitian yang telah ditetapkan, langkah selanjutnya adalah menentukan jumlah sampel pada masing-masing DAMIU. Penentuan tersebut menggunakan rumus proportionate stratified sampling sehingga pembagian sampel sesuai dengan proporsi jumlah konsumen. Hasil perhitungannya dapat dilihat pada tabel berikut :

Tabel 2. 1 Proporsi DAMIU di Kecamatan Bungoro

Nama Depot	Rata-rata Jumlah Konsumen Depot	Proporsi	Sampel
Depot 1	2500	0,0815	4
Depot 2	2000	0.0652	3
Depot 3	1800	0,0587	2
Depot 4	2200	0,0717	3
Depot 5	2800	0,0913	2
Depot 6	1500	0,0489	3
Depot 7	1200	0,0391	2
Depot 8	1700	0,0553	4
Depot 9	2600	0.0847	2
Depot 10	1900	0,0619	3
Depot 11	1600	0,0520	2
Depot 12	1400	0,0456	3
Depot 13	2400	0,0782	3
Depot 14	1800	0,0587	3
Depot 15	2500	0,0815	3
Depot 16	1300	0.0423	2
Total	31200	1.0000	44

c. Sampel Air (DAMIU)

Sampel air yang diambil pada penelitian ini yaitu air yang bersumber dari DAMIU dengan menggunakan air tanah sebagai sumber air bersih yang digunakan dalam pengolahan air. Sampel lingkungan dalam penelitian ini adalah logam berat yaitu Pb dan CrVI pada DAMIU yang diambil berdasarkan teknik *Grab Sampling*. *Grab sampling* merupakan metode pengambilan sampel yang diambil secara langsung dari sumber tertentu pada satu waktu tanpa memperhatikan variasi waktu dengan volume yang sama yaitu dengan menggunakan botol sampling. Metode pengambilan sumber air sesuai Standar Nasional Indonesia (SNI) 6989.58:2008.

d. Prosedur Pengambilan Sampel Air

Sampel lingkungan berupa air minum isi ulang yang dikonsumsi oleh masyarakat Kecamatan Bungoro diperoleh secara langsung dari keran output Depot Air Minum Isi Ulang (DAMIU) yang menjadi sumber utama air minum masyarakat. Pengambilan sampel Pb dan CrVI dilakukan menggunakan teknik *Grab Sampling*, yaitu metode pengambilan sampel air pada satu titik lokasi dan satu waktu tertentu untuk merepresentasikan kondisi kualitas air saat pengambilan. Jumlah titik pengambilan sampel dalam penelitian ini sebanyak 16 DAMIU.

Setiap lokasi DAMIU diambil dua botol sampel, yaitu 1 botol HDPE berukuran 250 mL untuk analisis Pb dan 1 botol 250 mL untuk analisis CrVI. Setelah pengambilan, masing-masing sampel ditambahkan dengan asam nitrat (HNO_3) sebagai pengawet sampel air dan dimasukkan ke dalam cool box kemudian dibawa ke laboratorium.

Analisis konsentrasi logam dilakukan menggunakan dua instrumen, yaitu Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS) untuk pengukuran logam Timbal (Pb) dan spektrofotometri untuk pengukuran Kromium heksavalen (CrVI). Seluruh prosedur analisis dilakukan di laboratorium yang telah memenuhi standar operasional pengujian.

2.5 Pengumpulan Data

2.5.1 Data Primer

Data primer merupakan data yang didapat secara langsung dari sumber pertama, baik dari individu atau perorangan seperti hasil wawancara atau hasil pengisian kuesioner yang dilakukan oleh penulis. Data primer yang akan digunakan dalam penelitian ini yaitu konsentrasi logam berat Pb dan CrVI pada air serta karakteristik responden dalam penelitian yang meliputi berat badan, durasi pajanan, frekuensi pajanan.

2.5.2 Data Sekunder

Data sekunder dalam penelitian ini dikumpulkan melalui studi kepustakaan dan data dari pemerintah di lokasi penelitian. Studi kepustakaan yang dilakukan oleh peneliti melalui referensi buku, tugas akhir, jurnal penelitian, artikel, sumber-sumber yang berasal dari internet yang berkaitan dengan pembahasan penelitian ini. Data pemerintah setempat diambil dari *data base* pemerintah.

2.6 Prosedur Penelitian

1. Observasi lapangan.
2. Peneliti melakukan pengurusan surat izin untuk penelitian sebelum melaksanakan penelitian di lapangan.
3. Pengambilan data di lapangan.
4. Wawancara responden dilakukan untuk memperoleh data-data yang dibutuhkan untuk melakukan perhitungan dosis pajanan harian seperti karakteristik individu (Laju Asupan, Berat Badan, dan Umur) serta Pola Aktivitas (Lama Pajanan, Frekuensi Pajanan, dan Lama Tinggal).
5. Kemudian peneliti mempersiapkan kuesioner penelitian serta lembar persetujuan penelitian *informed consent*.
6. Tahap selanjutnya peneliti memeriksa kembali data data yang telah diperoleh, selanjutnya data tersebut diolah dan dianalisis.
7. Menghitung dosis pajanan harian yang diterima oleh responden.
8. Menentukan besaran risiko yang diperoleh responden.

2.7 Pengolahan dan Penyajian Data

1. *Editing* : Hasil dari wawancara dan observasi di lapangan dilakukan penyuntingan (*editing*) terlebih dahulu, untuk mengidentifikasi dan memperbaiki isian kuesioner penelitian yang bertujuan untuk memastikan agar data yang diperoleh telah diisi semua dengan baik.
2. *Coding* : Tahapan selanjutnya yaitu dengan pemberian kode (*coding*) yaitu mengubah data dari bentuk kalimat menjadi data angka atau bilangan yang sangat berguna dalam proses memasukkan data (*data entry*).
3. Memasukkan Data (*Data Entry*) atau *Processing* : Data Kuisoner yang telah diperoleh dari responden diubah ke dalam bentuk kode kemudian diolah dengan menggunakan *software Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS).
4. Pembersihan Data : Semua data dari responden perlu dilakukan pengecekan kembali untuk melihat kemungkinan terjadinya kesalahan atau ketidaklengkapan, kemudian dilakukan perbaikan.

2.8 Analisis Data

1. Analisis Univariat

Penelitian ini menggunakan analisis univariat sehingga dalam mengidentifikasi data yang telah terkumpul kemudian dianalisis secara deskriptif untuk mengetahui jenis dan sebaran datanya. Untuk mengetahui sebaran data dilakukan uji normalitas data. Uji normalitas data digunakan untuk mendeteksi distribusi data dari suatu variabel yang digunakan dalam penelitian. Terdapat dua jenis data dalam Analisis univariat yaitu data kategorik dan data numerik. Variabel kategorik yang disajikan dalam penelitian ini diantaranya adalah tempat tinggal dan jenis kelamin. Sedangkan untuk variabel numerik yang disajikan dalam penelitian ini diantaranya adalah konsentrasi Timbal dan Kromium, berat badan, durasi pajanan, frekuensi pajanan dan lama pajanan. Proses kegiatan analisis data digunakan *Microsoft Excel*.

2. Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL)

Data konsentrasi Timbal dan Kromium pada air, data antropometri dan data karakteristik masyarakat Kecamatan Bungoro yang telah terkumpul kemudian dilakukan analisis dengan menggunakan perhitungan nilai *intake*. *Risk Quetient* (RQ) untuk efek Non-Karsinogenik dan *Excess Cancer Risk* (ECR) untuk efek karsinogenik.

a. Perhitungan *Intake* (CDI Oral)

Perhitungan nilai *Intake* non karsinogenik pada jalur pemajanan ingesti (tertelan) dilakukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$CDI\ Oral = \frac{CW \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT}$$

Keterangan:

CDI : *Chronic Daily Intake* (mg/kg.hari)

CW : Konsentrasi kontaminan dalam air (mg/liter)

IR : Laju Pencernaan / *ingestion rate* (Liter air/hari)

EF : Frekuensi pajanan/ *exposure frequency* (hari/tahun)

ED : Durasi pajanan/ *exposure duration* (tahun)

BW : Berat badan/ *body weight* (kg)

AT : Rata rata waktu/ *average time* (untuk non-karsinogenik, AT=ED x 365 hari)

b. Perhitungan Karakteristik Risiko

Karakterisasi risiko dilakukan dengan menggabungkan analisis pajanan dan dosis respon. Karakterisasi risiko dibagi dalam dua hal, yaitu dinyatakan dalam *Risk Quotient* (RQ) untuk efek non karsinogenik dan dinyatakan dalam *Excess Cancer Risk* (ECR) untuk efek karsinogenik. Nilai RQ dihitung dengan membagi nilai asupan non karsinogenik dengan nilai dosis referensi (RfD atau RfC). Risiko kesehatan ada atau tinggi dan perlu dikendalikan jika $RQ > 1$, jika $RQ \leq 1$ risiko tidak perlu dikendalikan tetapi segala kondisi harus dipertahankan agar nilai numerik RQ tidak melebihi 1. Nilai ECR dihitung dengan mengalikan asupan karsinogenik dengan nilai *cancer slope factor* (SCF) (Fitra dan Awaluddin, 2019).

1) *Risk Quotient* (RQ) untuk efek non karsinogenik:

$$RQ = \frac{CDI}{RfD}$$

Keterangan :

RQ : Karakterisasi risiko

CDI : *Chronic Daily Intake*

RfD : Dosis referensi

Tabel 2.2 Nilai RfD Logam Berat pada Jalur Pajanan Ingesti

Logam Berat	RfD (mg/kg/hari) Ingesti	Referensi
Pb	0.004	ATSDR (2023)
CrVI	0.0009	USEPA IRIS (2024)

Sumber : ATSDR (2023), USEPA IRIS (2024)

2) *Excess Cancer Risk* (ECR) untuk efek karsinogenik:

$$ECR = I \times SF$$

Keterangan:

ECR : Tingkat risiko efek karsinogenik (*Excess Cancer Risk*)

SF : Nilai referensi agen risiko (*Slope Factor*)

I : *Intake* (paparan)

Tabel 2.3 Nilai SF Logam Berat pada Jalur Paparan Ingesti

Logam Berat	SF (mg/kg/hari) Ingesti	Referensi
CrVI	0.26	USEPA IRIS (2024)

Sumber : USEPA IRIS (2024)

3. Manajemen Risiko

Manajemen risiko merupakan langkah selanjutnya di luar ARKL yang dilakukan apabila hasil karakterisasi risiko menunjukkan tingkat risiko yang tidak aman atau berisiko terhadap kesehatan. Manajemen risiko dilakukan untuk memperkecil dampak paparan dari suatu agen melalui strategi pengelolaan risiko dalam melakukan pengelolaan risiko perlu dibedakan antara strategi pengelolaan risiko dengan cara pengelolaan risiko.

Berdasarkan karakteristik risiko, dapat dirumuskan pilihan-pilihan manajemen risiko untuk meminimalkan RQ dengan memanipulasi (mangubah) nilai faktor-faktor pemajanan yang tercakup dalam persamaan (1) sedemikian rupa sehingga asupan lebih kecil atau sama dengan dosis referensi toksisitasnya. Pada dasarnya hanya ada dua cara untuk untuk menyamakan *Ink* dengan *RfD* atau *RfC* atau mengubah *Ink* Sedemikian rupa sehingga RQ tidak melebihi <1, yaitu menurunkan konsentrasi risk agent atau mengurangi waktu kontak (Mallongi, 2019).

a. Mengurangi konsentrasi *risk agent* bila pola dan waktu konsumsi tidak dapat diubah.

Konsentrasi aman non-karsinogenik

$$Ck (aman) = \frac{RfD \times W_B \times t_{avg}}{R \times f_E \times D_t} \text{ mg/L}$$

Konsentrasi aman karsinogenik (ingesti)

$$Ck (aman) = \frac{\left(\frac{0.0001}{SF}\right) \times BW \times 70 \times 365}{R \times f_E \times D_t}$$

b. Pengurangan jumlah konsumsi

Laju konsumsi aman Non-Karsinogenik (ingesti)

$$Rk (aman) = \frac{RfD \times W_B \times t_{avg}}{C \times f_E \times D_t} \text{ L/hari}$$

Laju konsumsi aman Karsinogenik (ingesti)

$$Rk (aman) = \frac{(0.0001 / SF) \times W_B \times 70 \times 365}{C \times f_E \times D_t} \text{ L/hari}$$

BAB III

HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 HASIL

3.1.1 Gambaran Umum Lokasi Penelitian

Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan (Pangkep) merupakan salah satu kabupaten di Provinsi Sulawesi Selatan yang memiliki wilayah daratan dan kepulauan dengan topografi beragam, mulai dari dataran rendah, perbukitan, hingga pegunungan. Secara administratif, Kabupaten Pangkep terdiri atas 13 kecamatan dengan karakteristik wilayah yang berbeda-beda. Wilayah ini memiliki potensi sumber daya alam yang cukup besar serta aktivitas masyarakat yang beragam, baik di sektor pertanian, perikanan, maupun jasa, dengan konsentrasi penduduk yang relatif tinggi di kawasan daratan utama.

Penelitian ini dilaksanakan di Kecamatan Bungoro, yang dikenal sebagai salah satu pusat kegiatan industri di Kabupaten Pangkep. Kecamatan Bungoro merupakan lokasi berdirinya PT. Semen X, salah satu perusahaan besar di Indonesia bagian timur yang berkontribusi terhadap perekonomian daerah. Namun demikian, aktivitas industri berskala besar tersebut berpotensi menimbulkan pencemaran lingkungan, khususnya pada sumber air tanah yang menjadi bahan baku utama bagi Depot Air Minum Isi Ulang (DAMIU). Kondisi ini menjadikan Kecamatan Bungoro sebagai lokasi yang relevan untuk dilakukan penelitian terkait kualitas air dan potensi risiko kesehatan Masyarakat.

3.1.2 Karakteristik Responden

Responden dalam penelitian ini sebanyak 44 orang. Responden dalam penelitian ini adalah masyarakat Kecamatan Bungoro yang telah diseleksi dan telah memenuhi kriteria inklusi yang telah ditetapkan. Distribusi responden dapat dilihat pada Tabel 4.1 berikut ini:

Tabel 3. 1 Distribusi Responden Masyarakat Kecamatan Bungoro Tahun 2025

Karakteristik	(n)	%
Jenis Kelamin		
Laki-laki	7	15,9
Perempuan	37	84,1
Jenis Pekerjaan		
Belum Bekerja	7	15,9
IRT	12	27,3
Pekerjaan Swasta	8	18,2
Petani/Nelayan	5	11,4
PNS	8	18,2
Wiraswasta	4	9,1
Umur		
15-29 tahun	14	31,8
30-44 tahun	13	29,5

Karakteristik	(n)	%
≥ 60 tahun	6	13,6
Pendidikan		
SD	5	11,4
SMP	8	18,2
SMA	15	34,1
Sarjana	16	36,4

Sumber: Data Primer, 2025

Tabel 3.1 menunjukkan jumlah responden pada penelitian ini sebanyak 44 orang. Responden pada penelitian ini didominasi oleh responden yang berjenis kelamin Perempuan sebanyak 37 (84.1%) dan Laki-laki 7 (15.9%). Pada kelompok umur, responden terbanyak dengan 25 orang ada pada usia 15-29 tahun dengan presentase (31.8%). Sedangkan pada kategori jenis pekerjaan, dalam penelitian ini lebih banyak responden yang memiliki pekerjaan sebagai IRT sebanyak 12 orang dengan presentase (27.3%). Pada tingkat pendidikan didominasi oleh responden yang pendidikan terakhirnya setingkat sarjana.

Tabel 3. 2 Karakteristik Responden berdasarkan Berat Badan dan Pola Aktifitas Tahun 2025

Karakteristik	Min	Maks	Rerata	Standar Deviasi
Umur (Tahun)	17	69	43	15
Berat Badan (Kg)	43	88	64	10
Laju Asupan (L/Hari)	1,5	2,5	2	0,2
Frekuensi Paparan (Hari/Tahun)	360	365	362	2,4

Sumber : Data Primer, 2025

Berdasarkan Tabel 3.2 menunjukkan bahwa umur responden berkisar antara 17–69 tahun dengan rata-rata umur 43 tahun. Berat badan responden berkisar antara 43–88 kg dengan rata-rata 64 kg. Laju asupan air responden berkisar antara 1,5–2,5 liter per hari dengan rata-rata 2 liter per hari. Sementara itu, frekuensi paparan (EF) menunjukkan rata-rata sebesar 362 hari per tahun, yang menggambarkan lamanya responden berada di wilayah penelitian hampir setiap hari dalam satu tahun.

3.1.3 Penilaian Risiko

3.1.3.1 Identifikasi Logam Berat Pb dan CrVI Pada Air DAMIU

Identifikasi kandungan logam berat Pb dan Cr(VI) dilakukan pada sampel air hasil olahan Depot Air Minum Isi Ulang (DAMIU) yang digunakan masyarakat sebagai sumber utama air minum. Pengambilan sampel dilakukan pada 16 titik DAMIU yang dipilih berdasarkan kriteria inklusi. Setiap sampel diambil sebanyak 250 mL menggunakan botol sampel yang bersih dan telah dibilas terlebih dahulu dengan air yang akan diambil. Sampel kemudian diawetkan dengan penambahan HNO₃ pekat sesuai standar APHA (1998) untuk mencegah perubahan konsentrasi logam.

Setelah diawetkan, sampel disimpan dalam cool box dan dibawa ke laboratorium untuk dianalisis. Pemeriksaan kadar Pb dilakukan menggunakan alat Atomic Absorption Spectrophotometer (AAS), sedangkan CrVI dianalisis dengan metode Spektrofotometri.

3.1.3.2 Identifikasi Jenis Depot Air Minum Isi Ulang (DAMIU) di Kecamatan Bungoro

Sumber air minum masyarakat di Kecamatan Bungoro sebagian besar berasal dari Depot Air Minum Isi Ulang (DAMIU) yang tersebar di berbagai kelurahan. DAMIU berfungsi sebagai penyedia utama air siap konsumsi bagi masyarakat, terutama di sekitar kawasan industri yang berpotensi mencemari air tanah. Jenis depot yang digunakan masyarakat bervariasi, sebagian besar menggunakan sumber air tanah yang diolah melalui proses filtrasi sederhana, sementara sebagian kecil menggunakan teknologi yang lebih modern seperti *Reverse Osmosis* (RO). Namun, hasil observasi awal menunjukkan masih ada DAMIU yang tidak dilengkapi sistem filtrasi memadai sehingga meningkatkan risiko paparan logam berat Pb dan CrVI.

Berdasarkan data penelitian, pengambilan sampel dilakukan pada 16 titik DAMIU dengan koordinat berbeda di wilayah Kecamatan Bungoro. DAMIU tersebut meliputi depot skala kecil hingga menengah yang berada dekat dengan permukiman, maupun di sekitar jalur industri. Secara umum, DAMIU yang beroperasi di Kecamatan Bungoro masih bergantung pada kualitas sumber air tanah setempat tanpa perlindungan penuh terhadap kemungkinan kontaminasi. Kondisi ini menunjukkan bahwa keberadaan DAMIU di Bungoro merupakan sumber air minum utama masyarakat, namun kualitas pengolahan dan perlindungan dari kontaminan kimia masih bervariasi antar depot, dapat dilihat pada Tabel 3.3

Tabel 3. 3 Jenis Pengolahan DAMIU dan Tingkat Konsentrasi Logam Berat Pb dan CrVI di Kecamatan Bungoro Tahun 2025

Titik Sampel	Lokasi Penelitian	Jenis Pengolahan	Logam Berat (mg/L)	
			Pb	CrVI
1	Depot Amoi Malebbi	Filtrasi Sederhana	0.001	0.0102
2	Depot Albar	Reverse Osmosis (RO)	0.0097	0.01195
3	Putri Galon	Filtrasi Sederhana	0.001	0.010305
4	Depot Abidzar	Filtrasi sederhana	0.001	0.0103
5	Depot Abdul Karim	Reverse Osmosis (RO)	0.001	0.0105
6	Depot Anaure	Reverse Osmosis (RO)	0.001	0.011

Titik Sampel	Lokasi Penelitian	Jenis Pengolahan	Logam Berat (mg/L)	
			Pb	CrVI
7	Depot Jannah	Filtrasi sederhana	0.0065	0.01265
8	Depot Naufal	Filtrasi sederhana	0.0074	0.01275
9	Depot Eres RO	Reverse Osmosis (RO)	0.001	0.01045
10	Depot Dian	Filtrasi sederhana	0.0004	0.01
11	Depot Kayla	Filtrasi sederhana	0.001	0.0101
12	Pottuppung	Reverse Osmosis (RO)	0.001	0.01145
13	Depot Sumber Rezki	Filtrasi sederhana	0.00625	0.0124
14	Depot Maulidifa	Reverse Osmosis (RO)	0.0057	0.01285
15	Depot Aref Jaya	Filtrasi sederhana	0.00465	0.01305
16	Depot Je'ne Katapang	Reverse Osmosis (RO)	0.0075	0.012

Catatan : Baku Mutu air minum menurut Permenkes No. 2 Tahun 2023 yaitu Pb $\leq$ 0,01 mg/L dan CrVI $\leq$ 0,05 mg/L.

Sumber : *Data Primer*, 2025

Berdasarkan Tabel 3.3, analisis terhadap 16 sampel DAMIU di Kecamatan Bungoro menunjukkan bahwa variasi kadar Pb dan CrVI dipengaruhi oleh jenis pengolahan air. Semua nilai Pb berada pada rentang 0.0004–0.0097 mg/L, masih di bawah baku mutu Permenkes, namun DAMIU dengan filtrasi sederhana cenderung memiliki kadar Pb lebih tinggi dibandingkan DAMIU dengan sistem *Reverse Osmosis* (RO). Hal serupa terlihat pada CrVI dengan konsentrasi 0.0100–0.01305 mg/L, di mana nilai pada filtrasi sederhana lebih tinggi dibandingkan RO. Secara keseluruhan, sistem RO terbukti lebih efektif dalam menurunkan Pb dan CrVI sehingga menghasilkan kualitas air minum isi ulang yang lebih baik.

3.1.4 Analisis Paparan

3.1.4.1 Paparan Logam Berat Timbal Pb Dan CrVI

Analisis paparan dilakukan untuk menentukan dosis agen risiko Pb dan CrVI yang diterima individu sebagai asupan (intake), yang dihitung berdasarkan rumus yang telah ditetapkan dalam analisis risiko kesehatan lingkungan (ARKL). Dalam ARKL lengkap, data dan informasi mengenai konsentrasi (C), laju asupan (R), frekuensi paparan (fE), durasi paparan (Dt), dan berat badan (Wb) dikumpulkan dari populasi berisiko melalui survei dan pengukuran langsung di lapangan.

Frekuensi pajanan (fE) diperoleh melalui pertanyaan kepada responden mengenai kebiasaan mereka meninggalkan tempat tinggal dalam satu tahun, seperti bekerja, pulang kampung, atau berlibur, yang menyebabkan berkurangnya hari pajanan terhadap sumber air minum di wilayah studi. Durasi pajanan (Dt) dihitung dalam satuan tahun dan dibedakan berdasarkan jenis efek kesehatan, yaitu: durasi aktual tinggal responden untuk efek non-karsinogenik, serta asumsi standar 70 tahun untuk efek karsinogenik. Periode waktu rata-rata (tavg) juga mengikuti ketentuan ARKL, yaitu 10.950 hari untuk efek non-karsinogenik dan 25.550 hari untuk efek karsinogenik, yang menggambarkan waktu rata-rata terjadinya dampak kesehatan akibat pajanan kronis logam berat.

Agen risiko yang dianalisis dalam penelitian ini adalah logam berat Pb dan CrVI yang terdapat pada air hasil olahan Depot Air Minum Isi Ulang (DAMIU). Karakteristik dan pola aktivitas responden berpengaruh terhadap besarnya risiko kesehatan akibat pajanan logam berat tersebut, terutama faktor seperti berat badan (kg), frekuensi pajanan (hari/tahun), dan laju asupan air (L/hari).

3.1.4.2 Intake Non Karsinogenik dan Karsinogenik Realtime pada Responden

Nilai *Intake* (I) merupakan bagian dari analisis pemajanan dengan melakukan analisis karakteristik responden untuk mengetahui nilai *Intake* (I) dari setiap *risk agent* yang diambil pada sumber air minum yang berada di lokasi penelitian. Adapun hasil perhitungan asupan logam berat yang masuk kedalam tubuh. Nilai minimum, maksimum dan rata-rata asupan *Intake* (I) disajikan dalam Tabel 3.4 sebagai berikut:

Tabel 3. 4 Intake Responden Durasi Pajanan Realtime Pb dan CrVI Tahun 2025

Logam Berat	Intake (mg/kg/hari)			Ket.
	Min	Max	Mean	
Non Karsinogenik				
Pb	0,00001	0,000362	0,00011	MS
CrVI	0,00024	0,00058	0,00038	MS
Karsinogenik				
CrVI	0,00000454	0,00006279	0,0000229	MS

Keterangan : MS (Memenuhi Standar), TMS (Tidak Memenuhi Standar)

*Catatan : RfD Pb 0.004 (ATSDR, 2023), RfD CrVI 0.0009 mg/kg/hari (USEPA IRIS, 2024) dan CSF CrVI 0.26 mg/kg/hari (USEPA IRIS, 2024)

Sumber : Data Primer, 2025

Berdasarkan Tabel 3.4, nilai intake responden pada durasi pajanan realtime tahun 2025 menunjukkan bahwa logam berat Pb sebagai non karsinogenik memiliki nilai intake antara 0,00001 hingga 0,000362 mg/kg/hari dengan rata-rata 0,00011 mg/kg/hari, sedangkan CrVI non karsinogenik berada pada rentang 0,00024 hingga 0,00058 mg/kg/hari dengan rata-rata 0,00038 mg/kg/hari. Pada kategori karsinogenik, CrVI menunjukkan nilai intake minimum sebesar 0,00000454 mg/kg/hari dan maksimum sebesar 0,00006279 mg/kg/hari dengan rata-rata 0,00002290 mg/kg/hari. Jika dibandingkan dengan nilai RfD Pb sebesar 0.004 mg/kg/hari, RfD CrVI sebesar 0.0009 mg/kg/hari, serta CSF CrVI sebesar

0.26 mg/kg/hari, seluruh nilai intake tersebut berada jauh di bawah ambang batas toksikologis sehingga paparan logam berat Pb maupun CrVI pada responden dinyatakan masih memenuhi standar (MS).

3.1.5 Analisis Dosis Respon

Analisis dosis–respon dilakukan untuk menentukan parameter toksikologi logam berat Pb dan CrVI sebagai agen risiko dalam Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL). Untuk agen karsinogenik, CrVI memiliki nilai *Slope Factor* (SF) sebesar 0,26 mg/kg/hari (US-EPA 2024), yang digunakan dalam perhitungan Excess Cancer Risk (ECR) guna memperkirakan potensi risiko kanker akibat paparan jangka panjang melalui jalur ingesti. Sementara itu, untuk agen non-karsinogenik digunakan nilai Reference Dose (RfD) sebagai batas aman paparan harian, yaitu untuk Pb 0,004 mg/kg/hari (ATSDR 2023) dan untuk CrVI 0,0009 mg/kg/hari (US-EPA 2024). Kedua nilai RfD tersebut dimanfaatkan dalam perhitungan *Hazard Quotient* (HQ) untuk menilai tingkat risiko non-karsinogenik pada masyarakat. Dengan demikian, analisis dosis–respon terhadap Pb dan CrVI memberikan gambaran menyeluruh mengenai potensi risiko kesehatan yang bersifat karsinogenik maupun non-karsinogenik akibat paparan logam berat melalui konsumsi air minum.

3.1.6 Karakteristik Risiko

Karakterisasi risiko dilakukan dengan menggabungkan hasil analisis pajanan dan dosis-respons. Tahap ini bertujuan untuk memperkirakan kemungkinan terjadinya efek kesehatan akibat paparan logam berat pada responden. Untuk logam berat Pb yang bersifat non-karsinogenik, karakterisasi risiko dinilai melalui perhitungan *Risk Quotient* (RQ), yang diperoleh dengan membagi nilai asupan harian (*intake*) dengan *Reference Dose* (RfD). Nilai $RQ \leq 1$ menunjukkan bahwa paparan masih berada dalam batas aman, sedangkan nilai $RQ > 1$ menandakan potensi risiko kesehatan non-karsinogenik yang perlu diwaspadai. Sementara itu, untuk logam berat CrVI yang bersifat karsinogenik, karakterisasi risiko dinyatakan dalam bentuk *Excess Cancer Risk* (ECR), yaitu hasil perkalian antara nilai *intake* dengan *Slope Factor* (SF). Nilai ECR menunjukkan probabilitas peningkatan risiko kanker akibat pajanan seumur hidup, paparan dianggap aman apabila $ECR \leq 1 \times 10^{-4}$ atau $\leq 1/10.000$, sedangkan nilai $ECR > 1 \times 10^{-4}$ (atau $>1/10.000$) menandakan risiko karsinogenik.

3.1.6.1 Risk Quotient (RQ) Realtime Pb dan Excess Cancer Risk (ECR) Realtime CrVI pada Responden

Perhitungan asupan logam berat berdasarkan durasi pajanan aktual (Dt) memberikan gambaran mengenai besarnya potensi risiko kesehatan yang mungkin dialami oleh masyarakat. Nilai mean, median, minimum, dan maksimum risiko dihitung sesuai karakteristik toksikologis masing-masing logam. Risiko non-karsinogenik akibat pajanan Pb dan CrVI dinilai menggunakan indikator *Risk Quotient* (RQ), sedangkan risiko karsinogenik akibat pajanan CrVI dievaluasi melalui parameter *Excess Cancer Risk* (ECR). Hasil estimasi risiko berdasarkan durasi pajanan aktual tersebut disajikan pada Tabel 3.5 berikut :

Tabel 3. 5 Risk Quotient (RQ) Realtime Pb dan Excess Cancer Risk (ECR) Realtime CrVI Tahun 2025

GVI Tahun 2023				
Logam	Intake (mg/kg/hari)			Ket.
Berat	Min	Max	Mean	
Non Karsinogenik				
Pb	0,00368	0,09042	0,02869	Acceptable
CrVI	0,26936	0,63983	0,42742	Acceptable
Karsinogenik				
CrVI	0,00000122827	0,000042033	0,0000102498	Acceptable

Keterangan : $RQ \geq 1$ (*Unacceptable*), $RQ < 1$ (*Acceptable*) dan $ECR \geq 10^{-4}$ (*Unacceptable*), $ECR < 10^{-4}$ (*Acceptable*)

Sumber : Data Primer, 2025

Berdasarkan Tabel 3.5, tingkat risiko non-karsinogenik logam Pb dan CrVI pada responden masih berada di bawah ambang batas $RQ < 1$, dengan nilai rata-rata masing-masing 0,02869 untuk Pb dengan kisaran 0,00368–0,09042 dan 0,42742 untuk CrVI dengan kisaran 0,26936–0,63983, sehingga dikategorikan *acceptable*. Untuk CrVI karsinogenik, nilai *Excess Cancer Risk (ECR)* rata-rata 0,0000102498 dengan kisaran 0,00000122827–0,000042033 juga masih di bawah ambang batas $ECR < 1 \times 10^{-4}$, sehingga termasuk *acceptable* dan menunjukkan bahwa risiko kanker akibat paparan CrVI tergolong rendah.

3.1.7 Kategori Tingkat Risiko Paparan Pb Non Karsinogenik (RQ) dan Paparan Karsinogenik (ECR)

Berdasarkan beberapa literatur, diketahui bahwa logam berat Pb dan CrVI dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui jalur ingesti atau oral dan menimbulkan dampak kesehatan yang berbeda tergantung pada sifat toksiknya. Logam berat Pb umumnya menimbulkan efek non-karsinogenik, sedangkan CrVI memiliki sifat ganda, yaitu bersifat karsinogenik dan juga non-karsinogenik, sehingga dapat berpotensi menyebabkan kanker akibat paparan jangka panjang sekaligus menimbulkan risiko non-karsinogenik. Risiko non-karsinogenik dinyatakan dalam bentuk *Risk Quotient (RQ)*, yang dihitung dari hasil pembagian antara intake harian dengan nilai dosis acuan *Reference Dose (RfD)*. Sedangkan risiko karsinogenik dinyatakan dalam bentuk *Excess Cancer Risk (ECR)*, yang diperoleh dari perkalian antara intake karsinogenik dengan dosis acuan karsinogenik *Slope Factor (SF)*. Hasil perhitungan tingkat risiko akibat paparan logam berat Pb dan CrVI melalui konsumsi air minum secara oral tersaji dalam Tabel 3.6 dan Table 3.7 sebagai berikut:

Tabel 3. 6 Distribusi Responden berdasarkan Realtime Kategori Tingkat Risiko Non Karsinogenik Pada Air Minum Tahun 2025

Logam Berat	Besaran Risiko	
	$RQ \leq 1$	$RQ > 1$
Pb	100%	0%
CrVI	100%	0%

Sumber : Data Primer, 2025

Berdasarkan tabel tersebut, tingkat risiko non-karsinogenik logam berat Pb dan CrVI pada jalur paparan ingesti atau oral ditentukan berdasarkan nilai RQ. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa seluruh responden (100%) untuk logam Pb maupun CrVI memiliki nilai $RQ \leq 1$, sedangkan tidak terdapat responden (0%) dengan nilai $RQ > 1$. Hal ini mengindikasikan bahwa paparan Pb dan CrVI melalui jalur ingesti atau oral tidak menimbulkan risiko non-karsinogenik yang signifikan dan seluruh responden berada dalam kategori aman (*acceptable*).

Tabel 3. 7 Distribusi Responden berdasarkan Realtime Kategori Tingkat Risiko Karsinogenik Pada Air Minum Tahun 2025

Logam Berat	Besaran Risiko	
	$\leq E^{-4}$	$> E^{-4}$
Realtime (CrVI)	100%	0%

Sumber : Data Primer, 2025

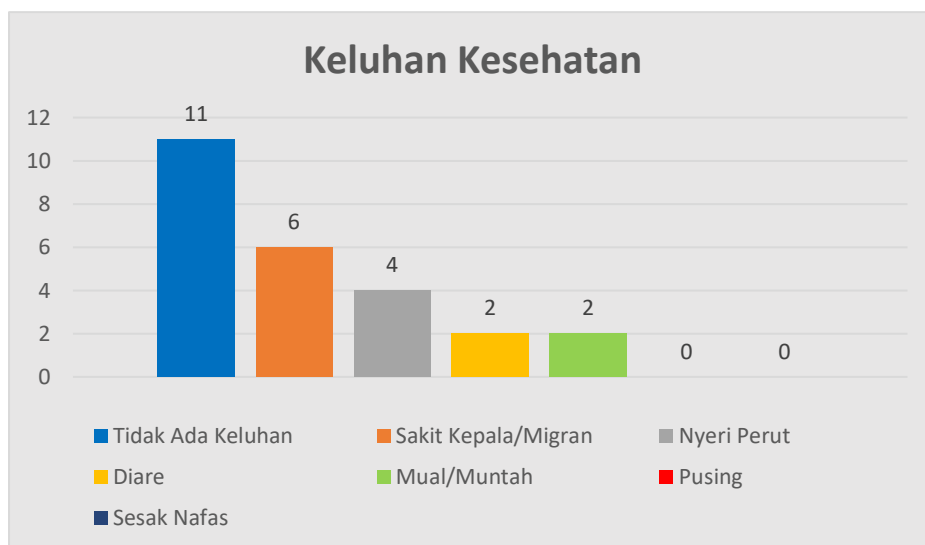
Berdasarkan tabel distribusi risiko karsinogenik, seluruh responden (100%) memiliki nilai Excess Cancer Risk (ECR) $\leq 1 \times 10^{-4}$ untuk paparan CrVI (*realtime*), sedangkan tidak terdapat responden (0%) dengan nilai $ECR > 1 \times 10^{-4}$. Hasil ini menunjukkan bahwa risiko kanker akibat paparan CrVI berada dalam batas yang dapat diterima (*acceptable*) dan mengindikasikan bahwa paparan CrVI melalui jalur paparan yang diteliti tergolong rendah pada seluruh responden.

3.1.8 Manajemen Risiko

Berdasarkan karakterisasi risiko, seluruh nilai RQ dan ECR berada dalam kisaran aman, sehingga tidak memenuhi kriteria untuk dilakukan intervensi manajemen risiko. Dalam situasi tanpa risiko, tindakan manajemen risiko tidak dihitung dan tidak diterapkan, karena tidak ada potensi dampak kesehatan yang perlu dikendalikan. Meskipun demikian, pemantauan kualitas air secara rutin tetap dianjurkan untuk memastikan kondisi aman tersebut dapat dipertahankan dari waktu ke waktu.

3.1.9 Keluhan Kesehatan Masyarakat

Berdasarkan Gambar 3.1, sebagian besar responden menyatakan tidak memiliki keluhan kesehatan, yaitu sebanyak 11 orang (41%). Keluhan yang paling sering muncul adalah sakit kepala atau migrain dengan jumlah 6 responden (23%), diikuti nyeri perut sebanyak 4 responden (15%). Keluhan diare dan mual/muntah masing-masing ditemukan pada 2 responden (8%). Sementara itu, tidak terdapat responden dengan keluhan pusing maupun sesak napas (0%). Secara keseluruhan, pola keluhan ini mengindikasikan adanya potensi permasalahan lingkungan, seperti kualitas air yang buruk atau sanitasi yang tidak memadai, terutama mengingat kemungkinan paparan logam berat dari konsumsi air minum isi ulang yang dapat memengaruhi sistem saraf dan saluran cerna.



Gambar 3. 1 Keluhan Kesehatan Masyarakat di Kecamatan Bungoro

3.2 Pembahasan

Air bersih merupakan kebutuhan dasar yang sangat penting bagi kehidupan manusia serta menjadi salah satu indikator kesejahteraan dan kesehatan masyarakat. Hal ini sejalan dengan tujuan Sustainable Development Goals (SDG 6) yang menargetkan ketersediaan air minum aman bagi seluruh penduduk dunia pada tahun 2030. Namun, pencapaian global masih tergolong lambat, dengan peningkatan akses air aman hanya dari 70% menjadi 74% pada periode 2015–2020 (Rajapakse, 2023). Tantangan kualitas air minum tidak hanya terjadi secara global, tetapi juga secara nasional dan lokal, khususnya pada wilayah yang berdekatan dengan aktivitas industri.

Di Indonesia, pencemaran air tanah oleh logam berat semakin menjadi perhatian, terutama di kawasan industri yang memanfaatkan bahan bakar fosil dan memiliki aktivitas produksi intensif. Penelitian menunjukkan bahwa kegiatan industri berpotensi meningkatkan kandungan logam berat seperti Pb dan CrVI pada tanah dan air tanah (Faturrahmi, 2018; Hendrayana et al., 2024). Sementara itu, Permenkes No. 2 Tahun 2023 mengatur bahwa air minum aman harus bebas dari kontaminan kimia berbahaya, termasuk logam berat yang dapat bersifat toksik bila terpapar secara terus-menerus.

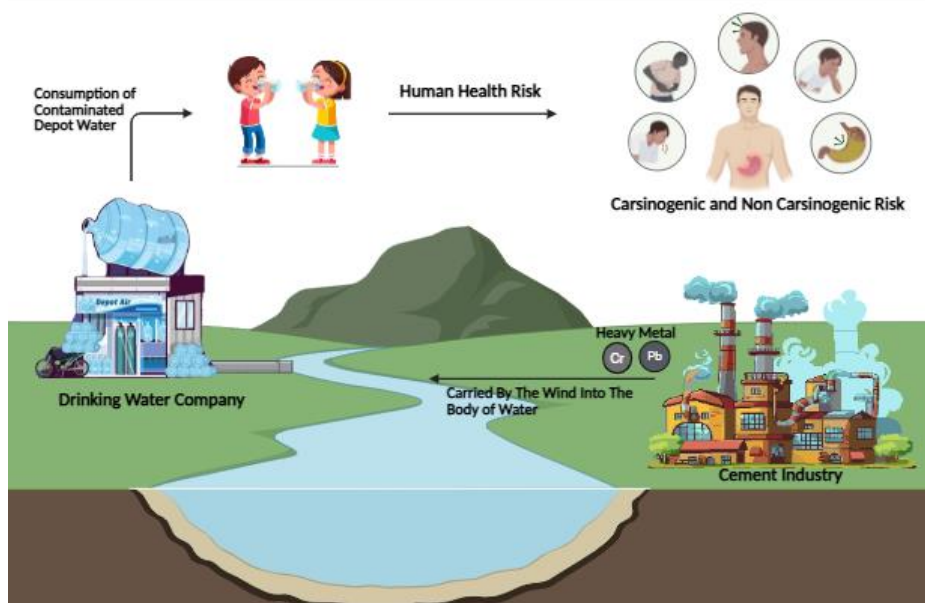
Kecamatan Bungoro di Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan merupakan kawasan yang relevan untuk dikaji mengingat intensitas aktivitas industri semennya yang sangat tinggi. Emisi industri semen, proses pembakaran batu bara, dan pengolahan batu kapur berpotensi melepas logam Pb dan CrVI ke lingkungan (Murodif et al., 2025; Mustafa et al., 2022). Mengingat sebagian besar masyarakat Bungoro menggunakan air tanah sebagai sumber air baku DAMIU, potensi paparan melalui konsumsi air minum menjadi isu kesehatan yang penting.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun konsentrasi Pb dan CrVI berada di bawah baku mutu, hal ini belum mencerminkan keamanan jangka panjang. Dalam penilaian risiko kesehatan, paparan berulang dengan frekuensi tinggi dapat

menghasilkan akumulasi dosis internal yang signifikan (EPA, 2023). Hampir seluruh responden di Bungoro mengonsumsi air DAMIU setiap hari, sehingga pola paparan bersifat kronis dan berpotensi meningkatkan beban internal logam berat.

CrVI merupakan kontaminan yang memiliki dua jalur risiko sekaligus, yaitu risiko non-karsinogenik dan karsinogenik. Secara non-karsinogenik, CrVI dapat menyebabkan iritasi gastrointestinal, gangguan metabolisme sel, dan stres oksidatif. Secara karsinogenik, CrVI bersifat genotoksik karena kemampuannya memasuki sel melalui transporter anion dan mengalami reduksi intraseluler yang menghasilkan radikal bebas serta kerusakan DNA (ATSDR, 2012). Dengan demikian, CrVI dikategorikan sebagai karsinogen kelompok 1 oleh IARC. Sebaliknya, Pb dalam konteks paparan oral melalui air minum terutama berisiko non-karsinogenik, meliputi gangguan saraf, ginjal, sistem hematologi, dan perkembangan anak (ATSDR, 2020). Dalam studi toksikologi, bukti karsinogenisitas Pb pada manusia melalui rute oral masih terbatas, sehingga penilaian risiko pada penelitian ini difokuskan pada jalur non-karsinogenik.

Alur perpindahan kontaminan pada penelitian ini ditunjukkan melalui mekanisme lingkungan hingga masuk ke tubuh manusia. Emisi logam berat dari industri terbawa angin, mengalami deposisi ke tanah dan badan air, kemudian meresap ke akuifer dangkal yang menjadi sumber air baku DAMIU. Pada Gambar 3.2 digambarkan bagaimana air yang telah tercemar Pb dan CrVI diproses oleh DAMIU dan selanjutnya dikonsumsi masyarakat sehingga menciptakan rantai paparan yang berkelanjutan.



Gambar 3.2 Ilustrasi masuknya sumber paparan ke dalam tubuh

Gambar ini memperjelas bahwa industri semen merupakan sumber utama pelepasan logam berat ke lingkungan. Partikulat Pb dan CrVI yang terbawa angin mengalami deposisi ke badan air dan tanah, kemudian masuk ke aliran sungai dan akuifer yang menjadi sumber air baku DAMIU. Air depot yang diproduksi dari sumber air tersebut selanjutnya dikonsumsi oleh masyarakat setiap hari. Visualisasi risiko

kesehatan pada manusia dalam gambar menunjukkan bahwa CrVI memiliki dua risiko sekaligus non-karsinogenik dan karsinogenik sedangkan Pb terutama menyebabkan risiko non-karsinogenik. Dengan demikian, gambar tersebut secara komprehensif menunjukkan hubungan antara sumber pencemar, media perpindahan, jalur paparan, dan dampak kesehatan yang berpotensi timbul akibat konsumsi air depot yang terkontaminasi logam berat.

Selain faktor lingkungan, variasi teknologi pengolahan antar-DAMIU turut berpengaruh. DAMIU dengan teknologi filtrasi sederhana memiliki efektivitas yang lebih rendah dalam menghilangkan logam berat dibandingkan teknologi Reverse Osmosis (RO) (EPA, 2023). Namun efektivitas RO sangat bergantung pada pemeliharaan sistem. Studi menunjukkan bahwa banyak DAMIU tidak melakukan sanitasi dan penggantian membran secara rutin, sehingga kemampuan penyisihan logam berat dapat menurun dari waktu ke waktu (Direktorat Penyehatan Lingkungan, 2023; Putra & Mairizki, 2020).

Karakteristik individu seperti berat badan turut memengaruhi dosis internal yang diterima. Individu dengan berat badan lebih rendah, termasuk perempuan bertubuh kecil, anak-anak, dan lansia, berpotensi menerima dosis lebih tinggi per kilogram berat badan untuk volume konsumsi yang sama, sehingga lebih rentan terhadap efek toksisitas.

Secara keseluruhan, pembahasan ini menegaskan bahwa penilaian keamanan air minum tidak cukup hanya berdasarkan pemenuhan baku mutu konsentrasi logam berat. Pola konsumsi kronis, sifat toksik dan karsinogenik kontaminan (terutama CrVI), efektivitas pengolahan DAMIU, serta kerentanan individu merupakan faktor penting dalam menentukan risiko kesehatan jangka panjang. Pendekatan ini sejalan dengan konsep Water Safety Plan (WSP) WHO (2020), yang merekomendasikan identifikasi bahaya, penilaian risiko, dan kontrol berkelanjutan untuk menjamin keamanan air minum bagi masyarakat.

3.2.1 Konsentrasi Timbal (Pb) dan Kromium (CrVI)

Konsentrasi Pb dan CrVI merupakan indikator utama dalam menilai kualitas air minum hasil olahan DAMIU karena kedua logam ini bersifat toksik dan dapat menimbulkan efek kesehatan serius meskipun pada konsentrasi rendah apabila terpapar secara terus-menerus. Pada penelitian ini, pengukuran dilakukan pada 16 DAMIU yang berlokasi di Kecamatan Bungoro, Kabupaten Pangkajene dan Kepulauan, yaitu kawasan yang berdekatan dengan aktivitas industri PT Semen X. Pemilihan lokasi dilakukan melalui teknik purposive sampling berdasarkan kedekatan DAMIU dengan sumber potensi pencemar seperti pabrik semen dan area permukiman padat. Hasil analisis laboratorium menunjukkan bahwa kadar Pb pada air DAMIU berkisar antara 0,0004–0,0097 mg/L, sementara kadar CrVI berada pada kisaran 0,0100–0,01305 mg/L. Berdasarkan baku mutu Permenkes No. 2 Tahun 2023 ($Pb \leq 0,01$ mg/L; $CrVI \leq 0,05$ mg/L), seluruh sampel memenuhi standar, namun beberapa depot memiliki nilai yang mendekati batas ambang, khususnya untuk Pb.

Lebih lanjut, berdasarkan Tabel 3.3, variasi kadar Pb dan CrVI tersebut dipengaruhi oleh jenis pengolahan air yang digunakan oleh masing-masing DAMIU. Depot yang menggunakan sistem filtrasi sederhana cenderung

memiliki kadar Pb lebih tinggi dibandingkan DAMIU dengan teknologi Reverse Osmosis (RO), dan pola yang sama terlihat pada CrVI, meskipun selisihnya tidak terlalu tajam. Secara umum, sistem RO terbukti lebih efektif dalam menurunkan konsentrasi logam berat dibandingkan filtrasi konvensional. Perbedaan konsentrasi ini menunjukkan bahwa kualitas air minum isi ulang tidak hanya bergantung pada kondisi sumber air baku, tetapi juga efektivitas pengolahan dan pemeliharaan peralatan yang digunakan oleh depot.

Variasi konsentrasi logam berat antar-DAMIU dipengaruhi oleh perbedaan teknologi pengolahan air, frekuensi perawatan filter, serta kedekatan dengan sumber pencemar. DAMIU dengan RO umumnya menunjukkan konsentrasi Pb lebih rendah dibandingkan filtrasi sederhana sejalan dengan temuan Kapepula et al. (2024) bahwa RO mampu menurunkan kadar logam berat hingga 95–98%. Namun, efektivitas RO sangat bergantung pada perawatan rutin dan kemampuan penyisihan dapat menurun drastis bila membran tidak diganti secara berkala. Sebaliknya, CrVI cenderung lebih sulit ditangani karena bentuk heksavalennya lebih mobil dan memiliki afinitas rendah terhadap media filtrasi tertentu. Selain itu, sebagian depot masih menggunakan pipa galvanis atau tangki logam yang rentan korosi sehingga dapat melepaskan Pb ke dalam air (Riyanto & Cahyadi, 2023).

Sumber pencemaran eksternal terutama terkait dengan aktivitas industri semen di wilayah Bungoro. Proses pembakaran batu bara menghasilkan fly ash yang mengandung logam berat seperti Pb dan Cr, yang dapat terbawa angin lalu terdeposisi ke tanah serta meresap ke akuifer dangkal yang menjadi sumber air baku DAMIU. Beberapa studi melaporkan bahwa residu pembakaran industri semen menghasilkan CrVI dalam bentuk oksida yang sangat mudah larut (Hanum et al., 2024; Deng et al., 2023). Kondisi geologi berpasir di Pangkep mempercepat proses pelindian, sedangkan arah angin dominan menyebabkan distribusi logam berat lebih tinggi pada depot yang berlokasi di jalur angin dari pabrik semen (Sirait et al., 2023). Dengan demikian, perbedaan teknologi pengolahan air, pengaruh lingkungan industri, serta kondisi infrastruktur depot menjadi faktor utama penyebab bervariasinya kadar Pb dan CrVI pada DAMIU di Kecamatan Bungoro.

3.2.2 Berat Badan (Wb)

Berat badan merupakan salah satu parameter paling penting dalam Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) karena berfungsi sebagai faktor pembagi dalam perhitungan intake atau Chronic Daily Intake (CDI), yaitu besar paparan zat kimia yang masuk ke tubuh per satuan berat badan. Berdasarkan Tabel 3.2, berat badan responden dalam penelitian ini berkisar antara 43–88 kg dengan rata-rata 64 kg dan standar deviasi 10 kg. Nilai ini relatif sesuai dengan kisaran berat badan dewasa Asia (55–65 kg) sebagaimana disebutkan dalam pedoman Kementerian Kesehatan RI (2012), meskipun sedikit lebih rendah dari standar berat badan dewasa yang digunakan United States Environmental Protection Agency (USEPA), yaitu 70 kg sebagai nilai default untuk populasi dewasa dalam perhitungan risiko (USEPA, 2011). Variasi berat badan responden dipengaruhi oleh perbedaan asupan gizi, aktivitas fisik, dan

kondisi kesehatan sehingga menghasilkan rentang nilai yang cukup luas dalam populasi.

Secara toksikologis, berat badan memiliki peran langsung dalam menentukan besarnya pajanan internal suatu bahan berbahaya. Dalam formula CDI, berat badan digunakan sebagai penyebut (divisor), sehingga semakin besar berat badan seseorang maka semakin kecil dosis zat toksik yang diterima per kilogram berat tubuh. Sebaliknya, individu dengan berat badan yang lebih rendah menerima dosis yang lebih besar untuk jumlah paparan yang sama. Prinsip ini dikenal sebagai dose per unit body weight, yang menjelaskan bahwa massa tubuh berpengaruh langsung pada distribusi zat toksik dalam tubuh (ATSDR, 2020). Misalnya, pada responden dengan berat badan 50 kg, dosis per kilogram akan lebih tinggi dibandingkan responden berbobot 80 kg yang mengonsumsi air dengan kualitas dan jumlah yang sama. Hal ini juga sejalan dengan temuan Faisya et al. (2019), bahwa semakin kecil berat badan seseorang, semakin besar risiko kesehatan yang mungkin diterima, sedangkan individu dengan berat badan lebih tinggi cenderung memiliki nilai risiko lebih rendah karena distribusi zat toksik tersebar pada volume tubuh yang lebih besar.

Selain pengaruh terhadap perhitungan intake, komposisi tubuh seperti persentase jaringan lemak turut memengaruhi distribusi logam berat. Individu dengan berat badan lebih tinggi umumnya memiliki cadangan jaringan lemak yang lebih besar sehingga beberapa logam berat dapat terperangkap atau tersimpan sementara di jaringan tersebut. Mekanisme ini dapat menurunkan konsentrasi logam berat bebas yang bersirkulasi dalam darah sehingga efek toksiknya dapat berkurang secara relatif (Prasetyo et al., 2022). Namun, pada individu berbobot rendah, terutama dengan massa lemak yang sedikit, logam berat lebih cepat berinteraksi dengan sel target sehingga potensi dampak toksiknya lebih besar.

Dalam konteks penelitian ini, masyarakat mengonsumsi air dari DAMIU yang terdeteksi mengandung Pb dan CrVI, meskipun masih berada di bawah batas maksimum Permenkes No. 2 Tahun 2023. Oleh karena itu, variabel berat badan sangat menentukan nilai intake dan estimasi risiko non-karsinogenik maupun karsinogenik. Individu dengan berat badan rendah akan menunjukkan nilai intake yang lebih tinggi dan potensi risiko yang lebih besar. Hal ini juga diperkuat oleh hasil penelitian Latif et al. (2025) yang menunjukkan bahwa variasi berat badan individu dapat secara signifikan memodifikasi besarnya nilai risiko pada penilaian ARKL logam berat dalam air minum. Dengan demikian, berat badan tidak hanya penting sebagai karakteristik responden, tetapi juga merupakan variabel kunci yang harus dipertimbangkan dalam interpretasi hasil perhitungan risiko kesehatan masyarakat (USEPA, 2011).

3.2.3 Laju Asupan

Laju asupan (Ingestion Rate / IR) ini menjadi salah satu faktor penting dalam perhitungan *Chronic Daily Intake* (CDI) yang menggambarkan besarnya pajanan logam berat Pb dan CrVI yang masuk ke dalam tubuh melalui konsumsi air. Berdasarkan analisis, nilai laju asupan yang tinggi akan

meningkatkan nilai CDI dan berpotensi menaikkan *Risk Quotient* (RQ) bila dikombinasikan dengan kadar logam berat yang mendekati ambang batas. Laju asupan atau jumlah air yang diminum oleh seseorang berbanding lurus dengan pajanan terhadap logam berat tersebut (Wulandari, 2021). Penelitian menunjukkan bahwa semakin tinggi laju asupan air yang terkontaminasi, semakin besar kemungkinan individu mengalami pajanan yang berlebihan, yang dapat berimbas pada berbagai masalah kesehatan seperti gangguan fungsi ginjal, keracunan, dan masalah neurologis. Hal ini sejalan dengan penelitian (Mallongi, 2019) yang menjelaskan bahwa peningkatan IR memiliki hubungan langsung terhadap peningkatan risiko kesehatan karena memperbesar jumlah zat kimia yang masuk ke dalam tubuh melalui konsumsi air minum setiap hari.

Berdasarkan hasil penelitian pada DAMIU di Kecamatan Bungoro, diperoleh bahwa rata-rata laju asupan air minum (*ingestion rate*) masyarakat adalah 2 liter per hari, dengan rentang antara 1,5–2,5 liter/hari dan frekuensi pajanan sebesar 362 hari per tahun. Nilai ini menunjukkan bahwa sebagian besar masyarakat mengonsumsi air dari DAMIU hampir setiap hari tanpa jeda yang berarti. Laju asupan tersebut termasuk dalam kategori normal sesuai pedoman (USEPA, 2011) untuk orang dewasa yang menetapkan rata-rata konsumsi air harian sebesar 2 liter/hari untuk jalur pajanan oral. Dengan rata-rata asupan air sebesar 2 liter per hari, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa masyarakat Bungoro memiliki tingkat pajanan yang relatif konstan dan berisiko bila konsentrasi logam berat dalam air DAMIU mendekati atau melebihi batas aman. Untuk mengurangi potensi risiko tersebut, salah satu langkah manajemen risiko yang direkomendasikan adalah menurunkan laju asupan air dari sumber yang terkontaminasi atau menggantinya dengan sumber air yang memiliki kadar Pb dan CrVI lebih rendah.

Sejalan dengan, Kementerian Kesehatan RI, Direktorat Jenderal PP dan PL (2012) yang menyebutkan bahwa konsumsi air minum harian masyarakat Indonesia umumnya berkisar antara 1,5–2,5 liter per hari, tergantung pada aktivitas dan kondisi lingkungan. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa laju asupan masyarakat di wilayah penelitian masih berada dalam kisaran wajar, tetapi perlu pengawasan kualitas air secara berkala agar pajanan logam berat tidak menimbulkan risiko kesehatan jangka panjang.

Penelitian oleh (Sukarjo et al., 2022) di Kabupaten Maros menemukan bahwa masyarakat dengan konsumsi air lebih dari 2 liter per hari memiliki risiko pajanan logam berat (terutama Pb) yang lebih tinggi dibandingkan kelompok yang mengonsumsi kurang dari 1,5 liter/hari. Hal ini dikarenakan logam berat bersifat akumulatif dan sulit dieliminasi dari tubuh, sehingga konsumsi air terkontaminasi dalam jumlah besar dapat meningkatkan beban toksikologis jangka panjang. Faktor sosial-ekonomi juga dapat memengaruhi laju asupan. Masyarakat dengan tingkat aktivitas fisik tinggi, seperti pekerja lapangan atau buruh industri, cenderung memiliki kebutuhan cairan yang lebih besar dibandingkan kelompok lain. Oleh karena itu, pada populasi yang berada di sekitar kawasan industri seperti Kecamatan Bungoro, pajanan logam berat dari

air minum isi ulang menjadi perhatian khusus karena kelompok ini berpotensi memiliki nilai IR lebih tinggi dari rata-rata populasi umum.

3.2.4 Frekuensi Paparan

Frekuensi paparan (Exposure Frequency/EF) merupakan parameter penting dalam Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) karena menggambarkan seberapa sering individu terpapar suatu kontaminan dalam periode satu tahun. Berdasarkan hasil penelitian di Kecamatan Bungoro, nilai EF masyarakat berkisar antara 360–365 hari per tahun dengan rata-rata 362 hari. Angka ini menunjukkan bahwa hampir seluruh responden mengonsumsi air dari DAMIU setiap hari tanpa jeda yang berarti, sehingga paparan terhadap logam berat Pb dan CrVI berlangsung secara konsisten sepanjang tahun. Jika dibandingkan dengan pedoman Guidelines for Health Risk Assessment dari USEPA (2004), nilai default EF untuk paparan oral pada orang dewasa adalah 350 hari per tahun, dengan mempertimbangkan adanya hari-hari ketika individu tidak terpapar karena bepergian, sakit, atau menggunakan sumber air alternatif. Oleh karena itu, nilai EF sebesar 362 hari/tahun yang ditemukan di Bungoro lebih tinggi dari standar referensi internasional, menunjukkan intensitas paparan yang lebih besar dibandingkan populasi umum.

Frekuensi paparan yang tinggi secara langsung meningkatkan nilai Chronic Daily Intake (CDI) dan berpotensi meningkatkan Risk Quotient (RQ), terutama jika konsentrasi logam berat dalam air mendekati atau melebihi ambang batas baku mutu. Hal ini penting mengingat Pb dan CrVI merupakan logam berat bersifat toksik kumulatif, sehingga paparan berulang meskipun dalam dosis kecil dapat menyebabkan akumulasi dalam tubuh dalam jangka panjang. Temuan penelitian ini konsisten dengan Mallongi (2019) yang menunjukkan bahwa peningkatan frekuensi konsumsi air terkontaminasi Pb memiliki hubungan signifikan dengan peningkatan nilai intake dan risiko non-karsinogenik pada masyarakat di kawasan industri semen di Sulawesi Selatan. Semakin tinggi nilai EF, semakin besar peluang logam berat masuk ke dalam tubuh secara berulang, sehingga memperbesar risiko kesehatan, khususnya pada kelompok rentan.

Tingginya nilai EF di Kecamatan Bungoro tidak hanya disebabkan oleh karakteristik konsumsi masyarakat, tetapi juga dipengaruhi oleh kondisi sosial-ekonomi dan keterbatasan sumber air bersih. Banyak rumah tangga di wilayah ini tidak memiliki akses air minum yang layak secara mandiri sehingga bergantung sepenuhnya pada DAMIU sebagai sumber air utama setiap hari. Kondisi tersebut menyebabkan tidak adanya variasi sumber air yang dikonsumsi, berbeda dengan wilayah lain yang memiliki pilihan seperti air galon bermerek, air sumur yang diolah, atau air perpipaan. Hal ini sejalan dengan temuan Handayani et al. (2022), yang melaporkan bahwa masyarakat di daerah industri yang mengandalkan air isi ulang sebagai sumber utama menunjukkan nilai EF lebih dari 360 hari per tahun, sehingga memperbesar risiko paparan kumulatif terhadap logam berat. Jika dibandingkan dengan kategori paparan pada Pedoman ARKL Kemenkes (2012), nilai EF >350 hari/tahun tergolong sebagai paparan tinggi, mencerminkan paparan harian

yang hampir konstan. Oleh karena itu, meskipun kadar Pb dan CrVI dalam air DAMIU masih berada di bawah baku mutu, tingginya frekuensi pajanan membuat risiko jangka panjang perlu diwaspadai, terutama jika terjadi kenaikan kadar logam berat akibat aktivitas industri di masa mendatang.

3.2.5 Durasi Pajanan

Durasi pajanan (Exposure Duration/ED) merupakan salah satu parameter utama dalam Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) karena menggambarkan lamanya individu terpapar kontaminan melalui media air minum. Dalam penelitian ini, durasi pajanan ditentukan berdasarkan lama konsumsi air minum depot air minum isi ulang (DAMIU) sebagai sumber air minum utama hingga saat penelitian dilakukan, yang diperoleh melalui wawancara langsung dengan responden. Pendekatan ini merepresentasikan durasi pajanan aktual (realtime exposure) yang dialami masyarakat Kecamatan Bungoro.

Penggunaan durasi pajanan realtime dipilih untuk memastikan bahwa penilaian risiko mencerminkan kondisi pajanan nyata di lapangan. Data durasi konsumsi air DAMIU yang diperoleh secara langsung dari responden memberikan gambaran spesifik populasi mengenai perilaku konsumsi air minum, sehingga lebih akurat dibandingkan penggunaan nilai default durasi pajanan jangka panjang. USEPA (2011) merekomendasikan penggunaan nilai default durasi pajanan apabila data spesifik populasi tidak tersedia, sedangkan dalam penelitian ini data pajanan aktual tersedia dan dapat digunakan dalam perhitungan risiko.

Hasil analisis menunjukkan bahwa meskipun masyarakat Bungoro mengonsumsi air DAMIU secara rutin hampir sepanjang tahun, dengan frekuensi pajanan rata-rata 362 hari per tahun, durasi pajanan aktual yang digunakan dalam perhitungan ARKL tidak menghasilkan nilai risiko kesehatan yang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa lamanya pajanan dalam konteks realtime belum cukup untuk menghasilkan dosis pajanan yang melebihi batas risiko yang dapat diterima.

Temuan ini menegaskan bahwa durasi pajanan perlu diinterpretasikan bersama dengan parameter pajanan lainnya, seperti konsentrasi kontaminan, laju asupan air minum, dan berat badan responden. Dalam kerangka ARKL, risiko kesehatan merupakan hasil interaksi antara seluruh parameter tersebut, sehingga durasi pajanan yang relatif panjang tidak serta-merta menghasilkan risiko tinggi apabila dosis pajanan yang diterima masih berada dalam batas aman (USEPA, 2011).

Dengan demikian, penggunaan durasi pajanan realtime dalam penelitian ini dinilai tepat dan relevan untuk menggambarkan kondisi pajanan aktual masyarakat Kecamatan Bungoro. Pendekatan ini memberikan dasar yang kuat dalam menilai risiko kesehatan lingkungan akibat konsumsi air DAMIU serta mendukung interpretasi hasil bahwa pada saat penelitian dilakukan, pajanan logam berat melalui air minum belum menunjukkan risiko kesehatan yang signifikan.

3.2.6 Intake (I)

Nilai intake (I) merupakan salah satu parameter utama dalam analisis pajanan pada Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) karena menggambarkan besarnya dosis logam berat yang masuk ke dalam tubuh manusia per satuan berat badan per hari (mg/kg/hari) melalui jalur pajanan ingesti. Dalam penelitian ini, nilai intake dihitung menggunakan pendekatan Chronic Daily Intake (CDI) dengan mempertimbangkan konsentrasi logam berat dalam air minum, laju konsumsi air minum harian, frekuensi pajanan, durasi pajanan aktual (realtime), berat badan responden, serta waktu rata-rata pajanan sesuai dengan pedoman penilaian risiko kesehatan lingkungan (USEPA, 2011).

Berdasarkan Tabel 3.4, nilai intake logam berat Timbal (Pb) sebagai agen non-karsinogenik pada durasi pajanan realtime berada pada kisaran 0,00001–0,000362 mg/kg/hari dengan nilai rata-rata sebesar 0,00011 mg/kg/hari. Sementara itu, nilai intake Kromium heksavalen (CrVI) non-karsinogenik berkisar antara 0,00024–0,00058 mg/kg/hari dengan nilai rata-rata 0,00038 mg/kg/hari. Variasi nilai intake ini menunjukkan adanya perbedaan tingkat pajanan antar responden yang dipengaruhi oleh variasi konsentrasi logam berat pada masing-masing DAMIU serta perbedaan karakteristik individu.

Jika dibandingkan dengan nilai acuan toksikologi yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu Reference Dose (RfD) Pb sebesar 0,004 mg/kg/hari dan RfD CrVI sebesar 0,0009 mg/kg/hari, seluruh nilai intake non-karsinogenik yang diperoleh masih berada di bawah ambang batas yang direkomendasikan. Hal ini mengindikasikan bahwa pajanan logam berat Pb dan CrVI melalui konsumsi air minum isi ulang pada kondisi pajanan aktual belum berpotensi menimbulkan risiko kesehatan non-karsinogenik yang signifikan, sebagaimana ditunjukkan oleh keterangan memenuhi syarat (MS).

Pada penilaian risiko karsinogenik, nilai intake CrVI digunakan dalam perhitungan Excess Cancer Risk (ECR) dengan mengacu pada nilai Cancer Slope Factor (CSF) CrVI sebesar 0,26 (mg/kg/hari). Berdasarkan hasil perhitungan, nilai intake CrVI karsinogenik berada pada kisaran 0,00000454–0,00006279 mg/kg/hari dengan nilai rata-rata sebesar 0,0000229 mg/kg/hari. Nilai intake yang relatif rendah ini menunjukkan bahwa pajanan CrVI melalui konsumsi air minum isi ulang pada kondisi realtime masih berada dalam batas risiko yang dapat diterima. Temuan ini sejalan dengan konsep penilaian risiko karsinogenik, di mana besarnya risiko kanker sangat dipengaruhi oleh dosis internal yang diterima tubuh serta karakteristik toksik zat pencemar tersebut (USEPA, 2011).

Perbedaan nilai intake antar responden dalam penelitian ini dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain variasi konsentrasi logam berat pada air DAMIU, perbedaan berat badan responden, serta variasi laju konsumsi dan frekuensi pajanan. Secara konseptual, nilai intake berbanding lurus dengan konsentrasi kontaminan, laju asupan, frekuensi, dan durasi pajanan, sehingga peningkatan salah satu parameter tersebut dapat meningkatkan dosis internal logam berat yang diterima tubuh (Jaishankar et al., 2014; Tchounwou et al.,

2014). Oleh karena itu, meskipun seluruh nilai intake pada kondisi pajanan aktual masih memenuhi standar (MS), pengawasan kualitas air minum DAMIU dan pengendalian proses pengolahan air tetap diperlukan sebagai langkah preventif untuk menjaga risiko kesehatan masyarakat tetap berada dalam batas aman.

3.2.7 Manajemen Risiko

Berdasarkan hasil karakterisasi risiko, seluruh nilai Risk Quotient (RQ) untuk Timbal (Pb) dan Kromium heksavalen (CrVI) serta nilai Excess Cancer Risk (ECR) untuk CrVI berada di bawah batas risiko yang dapat diterima menurut pedoman United States Environmental Protection Agency (USEPA). Kondisi ini menunjukkan bahwa skenario pajanan aktual (realtime) tidak menunjukkan potensi dampak kesehatan yang signifikan, sehingga tidak memerlukan penerapan intervensi manajemen risiko yang bersifat korektif. Dalam pedoman Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL), tindakan korektif direkomendasikan apabila nilai RQ untuk risiko non-karsinogenik melebihi 1 atau nilai ECR untuk risiko karsinogenik berada di atas batas toleransi yang direkomendasikan (Kemenkes RI, 2012; USEPA, 2004).

Meskipun demikian, upaya preventif tetap direkomendasikan untuk mempertahankan kondisi tersebut, mengingat wilayah Kecamatan Bungoro berdekatan dengan kawasan industri semen yang berpotensi meningkatkan kadar logam berat melalui deposisi atmosfer dan proses pelindian ke akuifer dangkal (Georgaki et al., 2023; Tchounwou et al., 2014). Pemantauan kualitas air secara berkala direkomendasikan sebagai langkah penting, dengan frekuensi minimal dua kali setahun sesuai dengan pedoman Kementerian Kesehatan dan BPOM, untuk memastikan efektivitas sistem pengolahan air pada DAMIU. Depot yang masih menggunakan sistem filtrasi sederhana perlu diarahkan untuk mengadopsi teknologi pengolahan yang lebih efektif, seperti reverse osmosis (RO), yang terbukti mampu mereduksi logam berat hingga lebih dari 95% apabila dilakukan perawatan secara rutin (Kapepula et al., 2024). Selain itu, pengawasan higiene sanitasi, pergantian filter, serta perbaikan infrastruktur distribusi perlu diperkuat, mengingat kerusakan komponen seperti pipa galvanis berpotensi meningkatkan pelepasan Pb ke dalam air olahan.

Dari aspek kebijakan, pemerintah daerah perlu memperkuat mekanisme pelaporan hasil uji kualitas air serta memastikan seluruh DAMIU mematuhi persyaratan Permenkes Nomor 2 Tahun 2023. Edukasi kepada masyarakat mengenai pemilihan DAMIU yang memenuhi standar higiene sanitasi serta upaya diversifikasi sumber air minum juga penting untuk mengurangi pajanan kumulatif. Seluruh langkah preventif ini sejalan dengan prinsip kehati-hatian (precautionary principle), yaitu melakukan upaya pencegahan meskipun risiko pada kondisi saat ini masih berada dalam batas yang dapat diterima, guna menjamin keamanan pajanan dalam jangka panjang.

3.2.8 Dampak Logam Berat Pb dan CrVI Terhadap Kesehatan Masyarakat

Paparan logam berat seperti timbal (Pb) dan kromium heksavalen (CrVI) melalui air minum merupakan isu kesehatan masyarakat yang penting,

terutama di wilayah yang berada di sekitar kawasan industri seperti Kecamatan Bungoro. Kedua logam tersebut bersifat toksik, persisten di lingkungan, dan berpotensi terakumulasi dalam tubuh manusia sehingga dapat menimbulkan efek kesehatan baik secara akut maupun kronis. Dalam konteks penelitian ini, masyarakat Bungoro berpotensi terpapar logam berat melalui konsumsi air minum isi ulang (DAMIU) yang bersumber dari akuifer dangkal di sekitar kawasan industri semen, di mana aktivitas industri, termasuk emisi debu dan residu pembakaran batu bara, berpotensi menjadi sumber Pb dan CrVI yang dapat masuk ke tanah dan air tanah.

Timbal (Pb) merupakan logam berat yang tidak memiliki fungsi biologis dalam tubuh dan dikategorikan sebagai toksikan sistemik dengan dampak utama pada sistem saraf, ginjal, dan sistem hematologi. Salah satu mekanisme toksisitas Pb adalah kemampuannya meniru ion kalsium (Ca^{2+}), sehingga mengganggu transmisi saraf dan proses pembentukan hemoglobin, yang dapat menyebabkan anemia, gangguan kognitif, hipertensi, serta penurunan fungsi ginjal (ATSDR, 2020; Tchounwou et al., 2014). Anak-anak merupakan kelompok paling rentan karena sistem sarafnya masih berkembang, sehingga paparan Pb dalam jumlah kecil sekalipun dapat berdampak pada penurunan IQ dan gangguan perkembangan. Dalam pedoman analisis risiko kesehatan, Pb umumnya dievaluasi sebagai agen non-karsinogenik melalui jalur oral karena bukti karsinogenisitasnya pada rute konsumsi belum dinilai cukup kuat oleh regulator seperti USEPA (USEPA, 2011). Oleh karena itu, penilaian risiko Pb pada penelitian ini difokuskan pada perhitungan nilai Risk Quotient (RQ) untuk efek non-karsinogenik.

Berbeda dengan Pb, kromium heksavalen (CrVI) memiliki potensi risiko baik non-karsinogenik maupun karsinogenik. CrVI merupakan bentuk kromium paling toksik karena bersifat sangat reaktif, mudah larut, dan mampu masuk ke dalam sel melalui jalur transportasi sulfat. Di dalam sel, CrVI mengalami proses reduksi menjadi CrIII yang menghasilkan radikal bebas, sehingga memicu stres oksidatif, kerusakan membran sel, gangguan saluran cerna, serta penurunan fungsi hati dan ginjal (Tumolo et al., 2020). CrVI telah diklasifikasikan sebagai karsinogen pada manusia oleh USEPA karena kemampuannya menyebabkan kerusakan DNA dan mutasi genetik yang dapat memicu kanker pada paparan jangka panjang melalui air minum (USEPA, 1998). Beberapa studi melaporkan bahwa konsumsi CrVI dalam jangka panjang, meskipun pada konsentrasi relatif rendah, berpotensi meningkatkan risiko kanker saluran cerna, seperti kanker lambung dan usus besar (Georgaki et al., 2023; Sazakli et al., 2024). Oleh karena itu, analisis risiko CrVI dalam penelitian ini mencakup perhitungan nilai RQ untuk risiko non-karsinogenik serta Excess Cancer Risk (ECR) untuk risiko karsinogenik.

Relevansi dampak kesehatan kedua logam berat tersebut di Kecamatan Bungoro semakin meningkat mengingat masyarakat mengonsumsi air dari DAMIU hampir setiap hari, yaitu rata-rata 362 hari per tahun berdasarkan hasil wawancara responden. Pola konsumsi rutin ini meningkatkan potensi akumulasi logam berat dalam tubuh. Pada kondisi paparan kronis, logam berat

bersifat kumulatif sehingga dampak kesehatannya umumnya baru muncul setelah periode konsumsi yang panjang. Meskipun hasil analisis risiko pada kondisi paparan saat ini menunjukkan bahwa nilai RQ dan ECR masih berada di bawah batas risiko yang dapat diterima, karakteristik Pb dan CrVI sebagai kontaminan persisten menuntut kewaspadaan terhadap potensi peningkatan risiko di masa mendatang, khususnya apabila terjadi peningkatan konsentrasi logam berat di lingkungan atau penurunan efektivitas sistem pengolahan DAMIU.

Dengan demikian, pemahaman terhadap dampak kesehatan Pb dan CrVI menjadi penting sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pengelolaan risiko dan pemantauan kualitas air. Karakteristik toksikologis kedua logam tersebut menunjukkan bahwa risiko kesehatan masyarakat dapat meningkat apabila terjadi perubahan kondisi lingkungan atau pola konsumsi air. Oleh karena itu, pemantauan kualitas air secara berkala, peningkatan teknologi pengolahan air, serta edukasi masyarakat merupakan strategi penting untuk mencegah munculnya dampak kesehatan jangka panjang.

3.2.9 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji risiko kesehatan masyarakat akibat paparan logam berat timbal (Pb) dan kromium heksavalen (CrVI) melalui konsumsi air minum hasil olahan Depot Air Minum Isi Ulang (DAMIU). Meskipun telah dirancang dan dilaksanakan sesuai dengan pedoman Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL), penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam interpretasi hasil, yaitu sebagai berikut:

1. Keterbatasan sumber dan jalur paparan

Sumber paparan logam berat yang dianalisis dalam penelitian ini terbatas pada air minum hasil olahan DAMIU melalui jalur paparan ingesti. Potensi paparan dari sumber lain, seperti konsumsi bahan pangan lokal, paparan udara ambien, serta kontak dermal, tidak diperhitungkan. Oleh karena itu, estimasi risiko kesehatan yang dihasilkan kemungkinan lebih rendah dibandingkan kondisi paparan nyata yang melibatkan berbagai sumber dan jalur paparan secara simultan.

2. Keterbatasan data kesehatan responden

Data kesehatan responden diperoleh melalui wawancara terkait keluhan atau gejala kesehatan yang dirasakan, tanpa didukung oleh pemeriksaan klinis atau pengukuran biomarker biologis, seperti analisis darah, rambut, atau urin. Kondisi ini menyebabkan hubungan kausal antara paparan logam berat dan dampak kesehatan belum dapat dikonfirmasi secara medis.

3. Keterbatasan waktu pengambilan sampel

Pengukuran kandungan logam berat pada air DAMIU dilakukan satu kali pada periode penelitian, sehingga belum mampu menggambarkan variasi konsentrasi logam berat yang mungkin terjadi akibat faktor musiman, perubahan kondisi lingkungan, maupun perbedaan operasional DAMIU dari waktu ke waktu.

4. Keterbatasan pendekatan analisis risiko

Penilaian risiko kesehatan dalam penelitian ini didasarkan pada perhitungan nilai Risk Quotient (RQ) untuk risiko non-karsinogenik dan Excess Cancer Risk (ECR) untuk risiko karsinogenik yang bersifat prediktif. Analisis hanya mencakup jalur pajanan oral, sehingga masih terdapat ketidakpastian dalam menggambarkan risiko kesehatan secara komprehensif apabila jalur pajanan lain, seperti inhalasi dan dermal, turut berkontribusi.

5. Keterbatasan analisis faktor lingkungan

Analisis sumber pencemaran logam berat dilakukan berdasarkan kondisi lingkungan dan aktivitas non-alamiah di sekitar lokasi penelitian. Penelitian ini belum mengkaji secara mendalam pengaruh faktor fisik lingkungan, seperti topografi, kondisi geologi, sistem hidrologi, serta karakteristik aliran air tanah, yang berpotensi memengaruhi distribusi dan konsentrasi logam berat di lingkungan.