

BAB I PENDAHULUAN UMUM

1.1 Latar Belakang

Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs) adalah kesepakatan global untuk mengakhiri kemiskinan, mengurangi kesenjangan, dan melindungi lingkungan (Aberilla et al., 2020). Salah satu tujuan SDGs, yaitu tujuan ke-6, menargetkan ketersediaan air bersih dan manajemen sanitasi yang berkelanjutan bagi semua pada tahun 2030. Salah satu target spesifik adalah memperbaiki kualitas air dengan mengurangi polusi, menghapuskan pembuangan limbah, dan meminimalkan pembuangan bahan kimia serta materi berbahaya, sambil meningkatkan daur ulang dan penggunaan ulang air secara aman (WHO, 2019).

Ketersediaan sumber air bersih semakin menurun akibat eksploitasi air tanah yang berlebihan dan tingginya tingkat pencemaran air permukaan. Dampak negatif eksploitasi air tanah meliputi rob atau banjir air pasang, amblesan tanah, intrusi air laut, dan pencemaran air tanah (Putranto & Kusuma, 2009). Sementara itu, air merupakan komponen penting untuk kelangsungan hidup semua makhluk hidup. Meski dua pertiga permukaan bumi terdiri dari air, sebagian besar adalah air asin. Air permukaan seperti sungai, laut, hujan, dan danau sangat rentan terhadap kontaminasi karena sifat air yang mudah melarutkan zat lain (Susanto et al., 2014). Dengan meningkatnya taraf hidup manusia, kebutuhan air bersih juga terus bertambah, sementara lebih dari 2 miliar orang di dunia mengalami kekurangan air bersih setiap harinya (WHO, 2000).

Sumber air di bumi meliputi air tanah, air permukaan, dan air atmosfer seperti air hujan. Air hujan umumnya tidak dimanfaatkan dan menjadi limpasan permukaan (surface runoff). Untuk mengatasi hal ini,

an solusi seperti metode pemanenan air hujan (rainwater harvesting/RWH) yang mencakup proses mencegat, mengalirkan, dan dan air hujan untuk digunakan di masa mendatang. Beberapa



teknologi RWH meliputi tangki penampungan, kolam penampungan, waduk kecil, atau danau buatan (Kharisma et al., 2016). Dalam penelitian, infiltrasi air hujan ke air tanah lebih disukai untuk wilayah perkotaan modern, tetapi memerlukan tangki penyimpanan besar (Nachshon et al., 2016).

Kualitas air hujan yang dipanen sangat bergantung pada lingkungan sekitar, bahan tangki, dan pemeliharaan sistem RWH. Air hujan dari atap mungkin mengandung logam berat dan mikroorganisme (van der Sterren et al., 2013; Hamdan, 2009). Kontaminasi dapat berasal dari bahan organik yang terdekomposisi, material atap, atau polutan udara. Oleh karena itu, pemurnian air diperlukan untuk memastikan kualitasnya layak digunakan. Pemurnian air melibatkan proses penghilangan atau pengurangan zat pencemar sehingga air memenuhi standar penggunaan, termasuk untuk air minum, industri, atau medis (Zulkarnain et al., 2017). Penelitian di Palestina menemukan senyawa radioaktif Radon (Rn) pada RWH yang tidak dikelola dengan baik. Oleh karena itu, metode seperti filtrasi sangat diperlukan (Al-Khatib et al., 2017).

Indonesia memiliki ketersediaan air 15.500 meter kubik per kapita per tahun, lebih tinggi dari rata-rata dunia, tetapi masih menghadapi masalah akses air bersih. Sebanyak 119 juta penduduk Indonesia tidak memiliki akses terhadap air bersih, dan sebagian besar penduduk mengandalkan penyalur air atau sumur air dalam (Untari & Kusnadi, 2015). Meski 99,2% rumah tangga merebus air untuk minum, 47,5% air tersebut masih mengandung *Escherichia coli* (Sehgal, 2006). Pada tahun 2009, hanya 47,63% penduduk Indonesia memiliki akses ke air minum yang aman. WHO memperkirakan 1,6 juta balita meninggal setiap tahun akibat air yang tidak aman dan kurangnya higienis (Public Health Corners, 2011).

Meningkatnya populasi menyebabkan peningkatan kebutuhan air bersih secara drastis. Permintaan air diperkirakan naik dari 3,3 miliar pada 2007 menjadi 6,4 hingga 9,7 miliar pada tahun 2050 (Domènech & 2011). Namun, kualitas air permukaan terus menurun akibat polusi industrialisasi dan limbah domestik, sehingga eksploitasi air tanah



meningkat (Ahmad & Danish, 2018; Tamaddun et al., 2018). Kekurangan akses air bersih memaksa masyarakat menggunakan air tidak sehat, meningkatkan risiko penyakit pencernaan dan kontaminasi logam berat seperti Cu, Pb, Cd, Zn, dan Hg (Kristianto, 2017; Oludairo & Aiyedun, 2015). Diperkirakan lebih dari 2 juta balita meninggal akibat air yang tercemar setiap tahun (Taiwo et al., 2020).

Beberapa negara maju telah mengadopsi sistem RWH dengan model berbeda. Di Brazil, tangki setengah tertanam di tanah digunakan untuk mencegah kontaminasi. Thailand menggunakan guci untuk menyimpan hingga 100 liter air, sementara di Indonesia, bak beton digunakan untuk menyediakan air selama musim kemarau, seperti di Gunung Kidul, Jawa Tengah (UNEP, 2001; Danang, 2008). Di Dusun Mulyosari, sistem RWH berbasis filter diperlukan untuk memenuhi kebutuhan air bersih selama musim kemarau. Desain ini memanfaatkan bahan lokal seperti ijuk, arang, daun kelor, pasir, dan kerikil untuk menghasilkan air yang memenuhi standar Permenkes 2023 (Soemitro & Suprayitno, 2018).

Data Puskesmas Sabang Kecamatan Bulagi Utara tahun 2022 menunjukkan bahwa 723 rumah di 8 desa menggunakan air hujan untuk kebutuhan air bersih. Namun, wadah penyimpanan seperti beton dan fiber berpotensi mencemari air, sehingga pengelolaan RWH yang baik sangat diperlukan. Strategi pengelolaan mempertimbangkan tingkat pencemaran untuk mencegah penyakit akibat air tercemar. Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) digunakan untuk mengidentifikasi risiko kesehatan yang mungkin timbul. ARKL juga merupakan pendekatan sesuai PerMenLH No 08/2006 dan KepMenKes No 876/Menkes/SK/VIII/2001 (Ma'rufi, 2017).

Simulasi Monte Carlo dapat digunakan untuk memodelkan ketidakpastian dalam analisis risiko kesehatan. Simulasi ini menghasilkan i probabilitas risiko, mencakup berbagai skenario dari yang terbaik erburuk. Data input seperti konsentrasi kontaminan, laju ingestasi, asi paparan memungkinkan evaluasi mendalam terhadap faktor-



faktor risiko (Morgan & Henrion, 1990). Hasil penelitian di beberapa negara menunjukkan bahwa meskipun kualitas kimia air RWH sesuai standar, kualitas mikrobiologi sering kali tidak memenuhi syarat (García-Montoya et al., 2015; Abdulla & Al-Shareef, 2009). Oleh karena itu, pengelolaan dan pengolahan air hujan sangat penting untuk meningkatkan kualitas air minum dan kesehatan masyarakat.

Berikut hasil studi yang relevan terkait penelitian tentang Pemanfaatan Air Hujan Sebagai Air minum metode pemanenan Air Hujan (*Rainwater Harvesting*) padat Tabel 1 berikut ini :

Tabel 1.
Penelitian yang relevan terakit Kualitas Air Hujan
sebagai Sumber air Minum

No	Pengarang	Judul	Hasil
1	Sánchez dkk (2015)(Sanchez., et al, 2015)	Pencemaran Fisik Kimia Dan Mikrobiologi Air Hujan Yang Dipanen di Atap Daerah Perkotaan (<i>Sustainability of Water Quality and Ecology</i>)	Kontaminan mikrobiologis dan fisik, kimia yang paling umum yang dapat ditemukan dalam sistem pemanenan air hujan dianggap, bersama dengan keberadaan bakteri patogen yang ditularkan melalui air dan kontaminan kimia yang muncul.
2	Helmreich, B., Horn, H., (2009)(Helmreich & Horn, 2009)	<i>Opportunities in rainwater harvesting (Jurnal Desalination)</i>	Air hujan dapat tercemar oleh bakteri dan berbahaya bahan kimia yang memerlukan perawatan sebelum digunakan. Penyaringan pasir lambat dan teknologi surya adalah metode untuk mengurangi polusi. Teknologi membran juga akan menjadi teknik desinfeksi potensial untuk pasokan air minum yang aman..
3	Lee, J.Y dkk (2010)(Lee et al., 2010)	<i>Comparison of the microbiological and chemical characterization of harvested rainwater and reservoir water as alternative water resources (Jurnal Science of the Total Environment)</i>	Parameter mikrobiologis, total coliform (TC) dan Escherichia coli (EC) masing-masing diukur pada 91,6% dan 72%, dari sampel air hujan yang dipanen pada tingkat yang melebihi pedoman untuk air minum, sesuai dengan kejadian curah hujan. Dalam kasus sampel air waduk, TC dan EC terdeteksi masing-masing pada 94,4% dan 85,2%, dari sampel pada level yang melebihi pedoman untuk air minum. Kedua indikator tersebut secara bertahap meningkat di musim panas dan musim gugur. Nilai median tertinggi dari TC dan EC terdeteksi selama musim gugur. Parameter kimia seperti anion umum dan kation utama serta ion logam dalam air hujan yang dipanen berada dalam kisaran yang dapat diterima untuk air minum.



No	Pengarang	Judul	Hasil
4	Leong, J.Y dkk (2017)(Leong et al., 2017)	Penilaian longitudinal kualitas air hujan di bawah kondisi iklim tropis untuk memungkinkan pemanenan air hujan yang efektif dan skema penggunaan kembali (<i>Journal of Cleaner Production</i>)	2 dari 37 sampel air hujan yang dipanen melebihi batas timbal dalam standar air minum Malaysia, menunjukkan bahwa mengonsumsi air hujan tanpa pengolahan tambahan dapat menimbulkan risiko kesehatan. Mencampur air hujan yang dipanen dengan air tanah menghasilkan fosfat dan total coliform yang lebih tinggi. Air hujan yang dikumpulkan selama musim hujan memiliki konsentrasi padatan tersuspensi, kekeruhan, dan <i>Escherichia coli</i> yang lebih tinggi daripada musim kemarau karena periode kemarau sebelumnya.
5	Mendez, C.B dkk (2011)(Mendez et al., 2011)	Pengaruh bahan atap terhadap kualitas air hujan yang ditampung (<i>Water research Journal</i>)	Studi ini menunjukkan bahwa air hujan yang dipanen dari atap logam cenderung memiliki konsentrasi bakteri indikator tinja yang lebih rendah dibandingkan dengan bahan atap lainnya. Namun, genteng beton dan atap dingin menghasilkan kualitas air hujan yang dipanen serupa dengan atap logam, yang menunjukkan bahwa bahan atap ini juga cocok untuk aplikasi pemanenan air hujan. Meskipun kualitas air yang sebanding dalam banyak hal dengan bahan atap lainnya, konsentrasi karbon organik terlarut sangat tinggi yang dapat menyebabkan tingginya konsentrasi logam (misalnya, arsenik) air hujan yang dipanen dari atap menunjukkan bahwa kualitas air hujan harus diperiksa secara hati-hati jika air hujan yang dipanen dipertimbangkan untuk penggunaan rumah tangga. Oleh karena itu, bahan atap merupakan pertimbangan penting saat merancang daerah tangkapan air hujan
6	Abdulla, F.A dkk (2009)(Abdulla & Al-Shareef, 2009)	Sistem pemanenan air hujan untuk air rumah tangga pasokan di Yordania (<i>Journal Desalination</i>)	Analisis dari sampel air hujan yang dipanen dari atap rumah tinggal menunjukkan bahwa senyawa anorganik diukur secara umum memenuhi standar WHO untuk air minum. Di sisi lain, fecal coliform, yang penting parameter bakteriologis, melebihi batas untuk air minum.
7	Nalwanga, R dkk (2018)(Nalwanga et al., 2018)	Studi tentang kualitas bakteriologis air hujan yang dipanen di atap dan evaluasi SODIS sebagai teknologi pengolahan yang cocok di pedesaan Afrika Sub-Sahara (<i>Jurnal Environmental Chemical Engineering</i>)	Hasil menunjukkan bahwa meskipun air hujan yang dipanen memenuhi standar air minum fisik kimia yang disyaratkan, mayoritas sampel dari semua jenis sistem menunjukkan tingkat kontaminasi mikrobiologis yang menunjukkan bahwa air tersebut tidak aman untuk diminum tanpa pengolahan.



No	Pengarang	Judul	Hasil
8	Daoud. A.K dkk (2011)(Daoud et al., 2011)	Penilaian Kualitas Air Hujan yang Dipanen dari Atap Di Tepi Barat, Otoritas Palestina (<i>Journal of Water and Health</i>)	Sekitar 67% dari semua sampel adalah terkontaminasi fecal coliform. Teknik PCR spesifik mengkonfirmasi adanya lima mikroorganisme patogen yang dapat diurutkan menurut prevalensinya seperti: Citrobacter (83%) > Acinetobacter (78%) > Aeromonas (52%) > Pseudomonas dan Campylobacter (7%).
9	Bae, S., Maestre, J.P., dkk (2019)(Bae et al., 2019)	Pemeriksaan komunitas mikroba dan terjadinya patogen manusia potensial dalam air hujan yang dipanen dari berbagai bahan atap (<i>Jurnal Water Research</i>)	Hasil ini menunjukkan bahwa jenis bahan atap mempengaruhi kualitas mikroba air hujan yang baru dipanen, menunjukkan bahwa pemilihan bahan atap dapat membentuk mikroba. Mengingat bahwa deteksi patogen potensial di air hujan yang baru dipanen juga berbeda antara bahan atap, jenis atap untuk menangkap air hujan perlu diperhatikan dalam perancangan sistem pemanenan air hujan, terutama jika airnya dimaksudkan untuk penggunaan air minum.
10	Franklin, L.J., dkk (2009)(Franklin et al., 2009)	Wabah Salmonella Typhimurium 9 di kamp sekolah terkait dengan kontaminasi tangki air hujan. (<i>Jurnal Epidemiology Infect.</i>)	Hasil dari empat sampel yang diambil dari tempat air minum bersumber air hujan pada tangki penampungan pribadi dua positif Salmonella Typhimurium definitif fag tipe 9 (DT9).
11	Ahmed, W., dkk (2011)(Ahmed et al., 2011)	Kualitas Mikrobiologi Air Hujan yang Dipanen di Atap dan Risiko Kesehatan (<i>Jurnal Environmental Quality</i>)	Beberapa patogen zoonosis dan protozoa terdeteksi di sistem air hujan individu dan komunal
12	Huston, R., dkk (2011)(Huston et al., 2012)	Pembagian sumber logam berat dan ionik kontaminan dalam tangki air hujan di daerah subtropis daerah perkotaan di Australia (<i>Jurnal Water research</i>)	Konsentrasi timbal dalam air tangki ditemukan bervariasi berbagai faktor lingkungan dan sistem pengumpulan, khususnya adanya timbal di atap. Hasilnya juga menunjukkan peran penting dari dinamika lumpur di dalam tangki pada kualitas air tangki.
13	Hamilton, K.A dkk (2016)(Hamilton et al., 2016)	Implikasi kesehatan masyarakat dari Acanthamoeba dan berbagai patogen oportunistik potensial dalam tangki air hujan yang dipanen di atap (<i>Jurnal Environmental Research</i>)	Kehadiran potensi oportunistik tersebut patogen dalam air tangki dapat menimbulkan risiko kesehatan baik dari penggunaan yang dapat diminum maupun yang tidak dapat diminum yang didokumentasikan dari data survei saat ini.



No	Pengarang	Judul	Hasil
14	Baguma, D., dkk (2010)(Baguma et al., 2010)	Pengetahuan tentang langkah-langkah untuk menjaga kualitas air hujan yang dipanen di rumah tangga domestik pedesaan (<i>Journal of Water and Health</i>)	Studi menunjukkan bahwa 84% responden mengetahui berbagai sumber pencemaran air hujan, namun hanya 5% menyadari bahwa mereka perlu menyesuaikan penggunaan air hujan, tergantung pada apakah mereka membersihkannya tangki atau tidak. Secara keseluruhan, temuan menekankan kebutuhan untuk menyediakan lebih banyak informasi kepada rumah tangga saat memasang tangki pemanenan air untuk memastikan bahwa panen air hujan memiliki kualitas yang tinggi.
15	Hart, C., White, D., (2006)(Hart & White, 2006)	Kualitas air dan bahan bangunan di daerah tangkapan air hujan di seluruh Alaska. (<i>Jurnal Environmental Engineering Science</i>)	Kualitas air di daerah tangkapan hujan tergantung pada bahan yang digunakan untuk membangun daerah tangkapan, frekuensi curah hujan, jumlah air yang terkumpul, kualitas curah hujan, aktivitas manusia dan hewan di sekitarnya, dan durasi penyimpanan air. Kontaminan yang paling bermasalah di daerah tangkapan air hujan adalah bakteri, senyawa organik yang mudah menguap, dan logam seperti timbal, tembaga, dan seng. Analisis statistik menunjukkan korelasi yang kuat antara bahan tangkapan dan konsentrasi logam dalam sampel air minum.
16	Waso, M., Khan, S., Khan, W., (2018)(Waso et al., 2018)	Penanda pelacakan sumber mikroba yang terkait dengan sistem pemanenan air hujan domestik: Korelasi dengan organisme indikator (<i>Jurnal Environmental Research</i>)	disimpulkan bahwa Bacteroides HF183 marker, adenovirus dan Lachnospiraceae dapat dimasukkan ke dalam toolbox untuk memantau kualitas perairan lingkungan, seperti air hujan yang dipanen, dan dapat digunakan untuk melengkapi analisis organisme indikator tradisional.
17	Nawaz, M., dkk (2012)(Nawaz et al., 2012)	Disinfeksi perak Pseudomonas aeruginosa dan E. coli dalam air hujan yang dipanen dari atap untuk keperluan minum (<i>Science of the Total Environment</i>)	Hasil menunjukkan pertumbuhan kembali di kedua mikroorganisme target hanya dalam kasus konsentrasi perak yang lebih rendah. Alasan yang mungkin untuk pertumbuhan kembali pada konsentrasi perak ini mungkin karena terhentinya proses replikasi sel bakteri untuk beberapa waktu tanpa kerusakan permanen. Kinetika penelitian ini menunjukkan bahwa inaktivasi yang lebih tinggi dan efek residu jangka panjang terhadap kedua MO dapat dicapai dengan penerapan perak pada 0,08 mg/l atau lebih tinggi di bawah batas aman.
18	Untari, T., Kusnadi, J.,  ari & J15)	Pemanfaatan Air Hujan Sebagai Air Layak Konsumsi Di Kota Malang Dengan Metode Modifikasi Filtrasi Sederhana (<i>Jurnal Pangan dan Agroindustri</i>)	Karakteristik fisik, kimia dan biologi air hujan di Kota Malang memenuhi standar baku mutu air bersih dari Permenkes RI Nomor: 416/MENKES/PER/IX/1990 dan hasil lebih optimal menurunkan beberapa parameter dengan teknologi filtrasi termodifikasi.

No	Pengarang	Judul	Hasil
19	Sazakli, E. Dkk (2007)(Sazakli et al., 2007)	Pemanenan air hujan, penilaian kualitas dan pemanfaatan di Pulau Kefalonia, Yunani (<i>Jurnal Water Research</i>)	menyangkut kualitas mikrobiologis, total coliform, <i>Escherichia coli</i> dan enterococci terdeteksi pada 80,3%, 40,9% dan 28,8% dari sampel air hujan, masing-masing, meskipun ditemukan dalam konsentrasi rendah. Bahan kimia dan parameter mikrobiologi menunjukkan fluktuasi musiman. Komponen utama analisis mengungkapkan bahwa parameter mikrobiologi dipengaruhi terutama oleh kebersihan tingkat daerah tangkapan, sedangkan parameter kimia dipengaruhi oleh kedekatan laut dan aktivitas manusia.
20	Khairil Anuar., dkk (2015)(Anuar & Ahmad, 2015)	Analisis Kualitas Air Hujan Sebagai Sumber Air Minum Terhadap Kesehatan Masyarakat (Studi Kasus di Kecamatan Bangko Bagansiapiapi) (<i>Jurnal Dinamika Lingkungan Indonesia</i>)	Hasil yang diperoleh sebagai berikut: (1). Itu kualitas air hujan di lokasi penelitian berdasarkan hasil parameter laboratorium berupa kimia anorganik, parameter fisika, parameter kimia masih dibawah air minum baku mutu yang dipersyaratkan oleh Peraturan Menteri No. 492/Menkes/Per/IV/2010 menunjukkan bahwa air hujan di lokasi penelitian merupakan air hujan yang dapat dikonsumsi oleh masyarakat dan tidak berbahaya bagi kesehatan
21	Despins, C., Farahbakhsh, K., & Leidl, C. (2009)(Despins et al., 2009)	Penilaian kualitas air hujan dari air hujan sistem pemanenan di Ontario, Kanada (<i>Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA</i>)	Hasil menunjukkan bahwa, sementara kualitas dapat diharapkan bervariasi dengan kondisi lingkungan, air hujan dari sistem pemanenan air hujan dapat berkualitas tinggi secara konsisten melalui pemilihan daerah tangkapan dan penyimpanan yang tepat bahan serta Penerapan penerapan
22	Abdullah, S. N. dkk (2022).(Nor et al., 2022)	Komposisi kimia air hujan yang dipanen di Malaysia Timur (<i>Korean Society of Environmental</i>)	Hasilnya menunjukkan bahwa garam laut, aerosol sekunder, jejak logam, asal kerak, dan asam organik mendominasi dimensi data air hujan dengan varian total 53,38% dan menunjukkan bahwa secara signifikan terdiversifikasi menjadi indeks kemurnian curah hujan yang baik. Dari kajian tersebut dapat ditetapkan bahwa komposisi kimiawi air hujan disebabkan oleh aktivitas setempat.
23	Morales-Figueroa, C. Dkk (2023)(C Morales-Figueroa, L A Castillo-Suárez, I Linares-Hernández, 2023)	Proses pengolahan dan analisis kualitas air hujan untuk penggunaan dan konsumsi manusia, sistem pengolahan dan kualitas air hujan	Adsorpsi / filtrasi memberikan efisiensi penghilangan kontaminan yang lebih tinggi selama pengolahan air hujan daripada perawatan lainnya. Penghapusan rata-rata dari studi yang berbeda adalah sekitar 80% kekeruhan, 100% <i>Escherichia coli</i> , 100% total padatan terlarut, 100% nutrisi, dan 60% kebutuhan oksigen kimiawi dan kebutuhan oksigen biologis.



No	Pengarang	Judul	Hasil
24	Atikul IM, dkk (2019)(Islam et al., 2019)	Evaluasi kualitas air hujan yang ditampung di sekolah dasar pesisir barat daya Bangladesh (<i>Jurnal Environmonit Asses</i>)	Konsentrasi Pb melebihi batas maksimum batas yang diperbolehkan untuk air minum yang ditunjukkan oleh WHO dan nilai pedoman air minum Bangladesh sebesar 92% dan 61% dari sampel masing-masing, dan rata-rata konsentrasi adalah 0,08 mg/l (8 kali lebih tinggi dari nilai pedoman WHO). Oleh karena itu, konsumsi air hujan yang dipanen pada sekolah dasar dapat menyebabkan risiko kesehatan yang besar bagi anak-anak yang bersekolah.
25	Iswanto, N. I. N, dkk (2022)(Iswanto et al., 2022)	Kualitas Air Hujan di Desa Sirongo Kecamatan Tidore Utara Kota Tidore Kepulauan (<i>Jurnal Natural</i>)	Hasil penelitian menunjukkan bahwa berdasarkan baku mutu dalam Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia No. 492/Menkes/Per/IV/2010 tentang Persyaratan Kualitas Air Minum, kualitas air hujan di Desa Sirongo ditinjau dari kondisi fisik. parameter (Bau, Rasa, Warna, Suhu, dan kekeruhan), parameter kimia (Flourida) dan parameter biologi (total coliform), memenuhi baku mutu, sedangkan parameter kimia (Besi dan pH) tidak memenuhi baku mutu.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang dapat dirumuskan beberapa permasalahan, antara lain:

1. Bagaimana tingkat konsentrasi Mikroorganisme (Total Coliform, Escherichia coli) dan konsentrasi kimia (Nitrat , Kadmium , Timbal , dan Fluorida) pada penampungan air hujan di Kecamatan Bulagi Utara?
2. Bagaimana tingkat risiko kesehatan non-karsinogenik dan karsinogenik pada penduduk akibat pajanan Total Coliform, Escherichia coli, Nitrat , Kadmium , Timbal , dan Fluorida dengan menggunakan Target Hazard Quotient dan Target Cancer Risk ?
3. Bagaimana risiko kesehatan akibat paparan multivariable faktor pencemar seperti Nitrat , Kadmium , Timbal , dan Fluorida dalam air hujan dapat diestimasi menggunakan pendekatan Monte Carlo lation (MCS) ?



4. Bagaimana strategi pengelolaan risiko kesehatan akibat paparan logam berat dan kontaminasi mikrobiologi dari air hujan yang digunakan sebagai sumber air minum di Kecamatan Bulagi Utara?

1.3 Tujuan Penelitian

1.3.1 Tujuan Umum

Model Simulasi Probabilistik Risiko Kesehatan Paparan Mikroorganisme dan Kimia Pada Air Hujan di Kecamatan Bulagi Utara Kabupaten Banggai Kepulauan.

1.3.2 Tujuan Khusus

1. Menganalisis tingkat konsentrasi bakteriologi (Total Coliform, Escherichia coli) dan konsentrasi kimia (Nitrat , Kadmium , Timbal , dan Fluorida) pada penampungan air hujan di Kecamatan Bulagi Utara.
2. Menghitung tingkat risiko kesehatan non-karsinogenik pada penduduk akibat paparan Total Coliform, Escherichia coli, Nitrat , Kadmium , Timbal , dan Fluorida dengan menggunakan pendekatan Target Hazard Quotient dan Target Cancer Risk di Kecamatan Bulagi Utara.
3. Menghitung tingkat risiko kesehatan karsinogenik pada penduduk akibat paparan Total Coliform, Escherichia coli, Nitrat , Kadmium , Timbal , dan Fluorida dengan menggunakan pendekatan Target Hazard Quotient dan Target Cancer Risk di Kecamatan Bulagi Utara.
4. Mengestimasi risiko dari multivariable faktor paparan akibat dampak bahan pencemar dalam air hujan (Nitrat , Kadmium , Timbal , dan Fluorida) menggunakan aplikasi Monte Carlo Simulation .
5. Merumuskan strategi pengelolaan risiko paparan logam berat dan kontaminasi mikrobiologi pada air minum masyarakat yang bersumber dari air hujan di Kecamatan Bulagi Utara, Kabupaten Banggai Kepulauan.



1.4 Manfaat Penelitian

1.4.1 Manfaat Teoritik

1. Penelitian ini diharapkan dapat melengkapi pemahaman masyarakat dan Pemerintah Daerah secara komprehensif tentang upaya pengelolaan risiko paparan kimia dan mikrobiologi pada air minum masyarakat yang bersumber air hujan di Kecamatan Bulagi Utara Kabupaten Banggai Kepulauan.
2. Penelitian ini diharapkan dapat memperkaya wawasan dan akan menemukan nilai-nilai ilmiah baru dalam upaya pengelolaan risiko paparan kimia dan mikrobiologi pada air minum yang bersumber air hujan di Kecamatan Bulagi Utara Kabupaten Banggai Kepulauan.
3. Penelitian ini dapat dijadikan acuan atau pedoman bagi masyarakat dan Pemerintah Daerah dalam masalah kesehatan lingkungan sebagai upaya pengelolaan risiko paparan kimia dan mikrobiologi pada air minum masyarakat yang bersumber air hujan di Kecamatan Bulagi Utara Kabupaten Banggai Kepulauan.

1.4.2 Manfaat Aplikatif

1. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dan menambah ilmu pengetahuan khususnya dalam bidang simulasi dengan menggunakan permodelan menggunakan Monte Carlo Simulation.
2. Meningkatkan pengetahuan masyarakat dan Pemerintah Daerah dalam mengendalikan dan mengatasi masalah pencemaran pada air minum masyarakat yang bersumber air hujan di Kecamatan Bulagi Utara Kabupaten Banggai Kepulauan.
3. Memberdayakan masyarakat dalam membantu mengawasi kondisi air hujan sebagai sumber air minum masyarakat berdasarkan kondisi Penampungan air hujan



ngendalikan perilaku masyarakat dan kebijakan Pemerintah daerah dalam perlindungan Penampungan Air Hujan sebagai sumber minum masyarakat.

1.4.3 Manfaat Praktis

Penelitian ini merupakan wahana untuk mengembangkan ilmu dan pengetahuan serta mengabdikan pengalaman dan keterampilan.

1.5 Ruang Lingkup Penelitian

Ruang lingkup penelitian ini berupa suatu penelitian observasional dengan rancangan Cross Sectional yaitu penelitian dengan cara observasi atau pengumpulan data pada waktu yang bersamaan (point time approach). Metode pendekatan yang dilakukan adalah dengan metode Environmental Health Risk Assessment (EHRA) dan metode Quantitative Microbial Risk Assesment (QMRA) dengan tujuan untuk menilai atau memprakirakan besaran risiko kesehatan manusia yang disebabkan oleh paparan bahaya lingkungan.

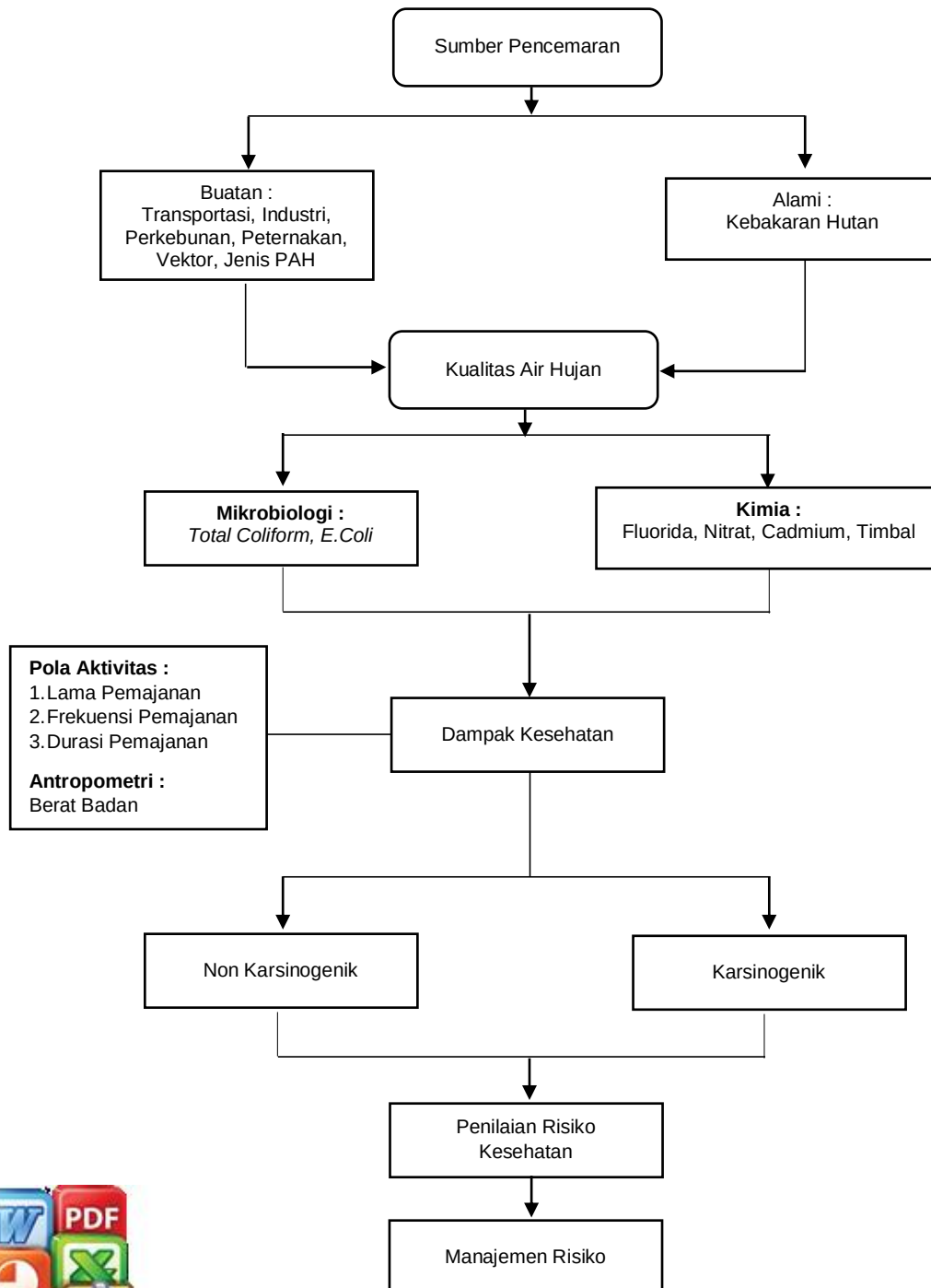
1.6 Kebaruan Penelitian

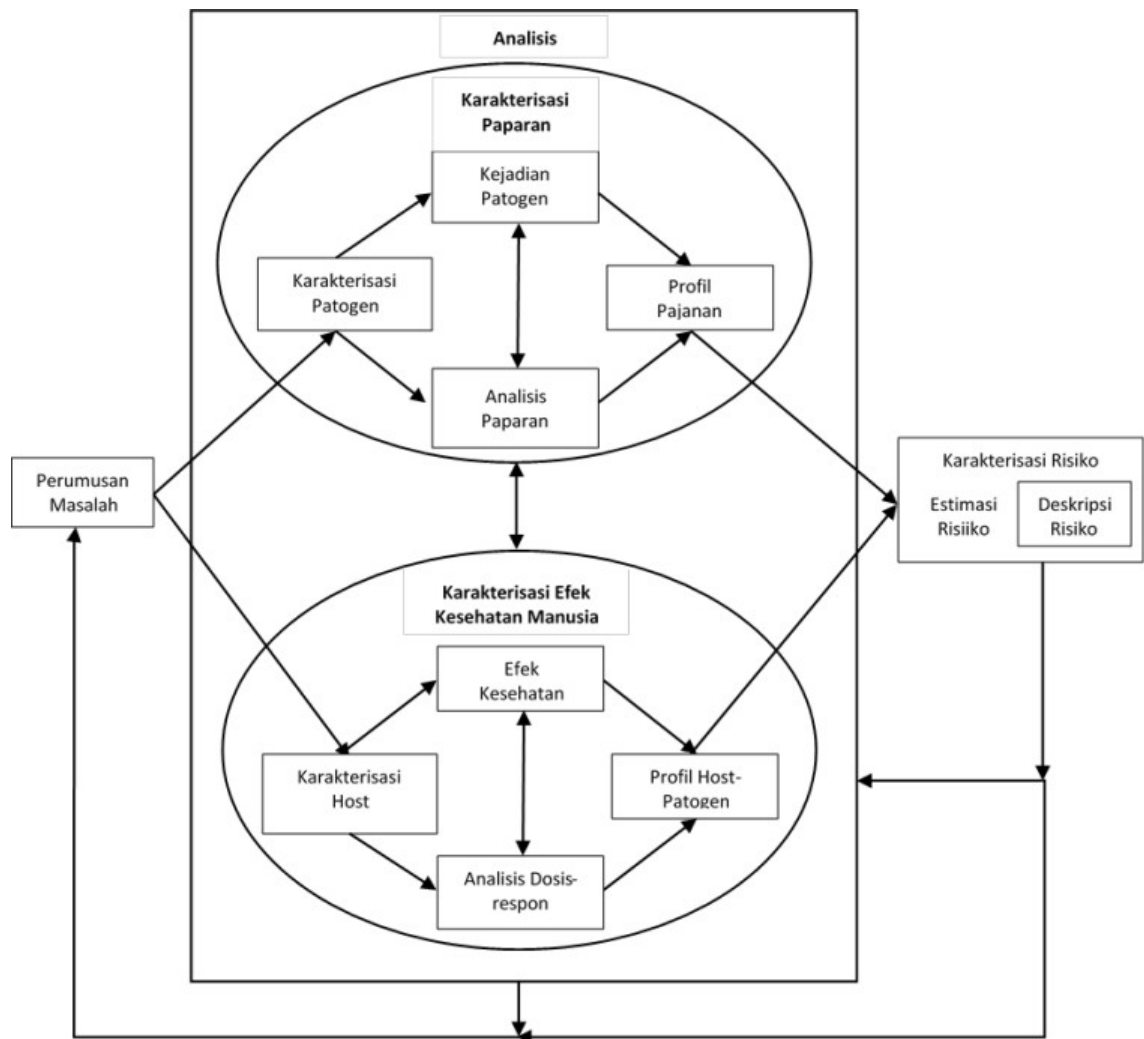
1. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan solusi melalui simulasi strategi pencegahan terhadap pencemaran air berdasarkan hasil pemodelan. Hasil simulasi ini diharapkan mampu menjadi dasar untuk merumuskan kebijakan solutif dalam pengendalian risiko paparan mikrobiologi (Total Coliform, *Escherichia coli*) dan kimia (Nitrat, Kadmium, Timbal, Fluorida).
2. Penelitian ini menghasilkan produk berupa strategi atau rancangan kebijakan yang bertujuan untuk pengendalian pencemaran air secara efektif dan efisien.
3. Metode yang digunakan dalam penelitian ini melibatkan estimasi risiko dari multivariable faktor paparan akibat bahan pencemar dalam air hujan (Nitrat, Kadmium, Timbal, Fluorida) menggunakan aplikasi Monte Carlo Simulation .



1.7 Kerangka Teori

Kerangka teori dalam penelitian ini diuraikan berdasarkan kerangka teori analisis risiko kesehatan lingkungan terhadap paparan logam berat dan mikroba patogen sebagai berikut.





Teori: Komponen penilaian risiko mikroba disadur dari International Life Sciences Institute (2000); modifikasi dari Mark Robson dan William Toscano (2007).

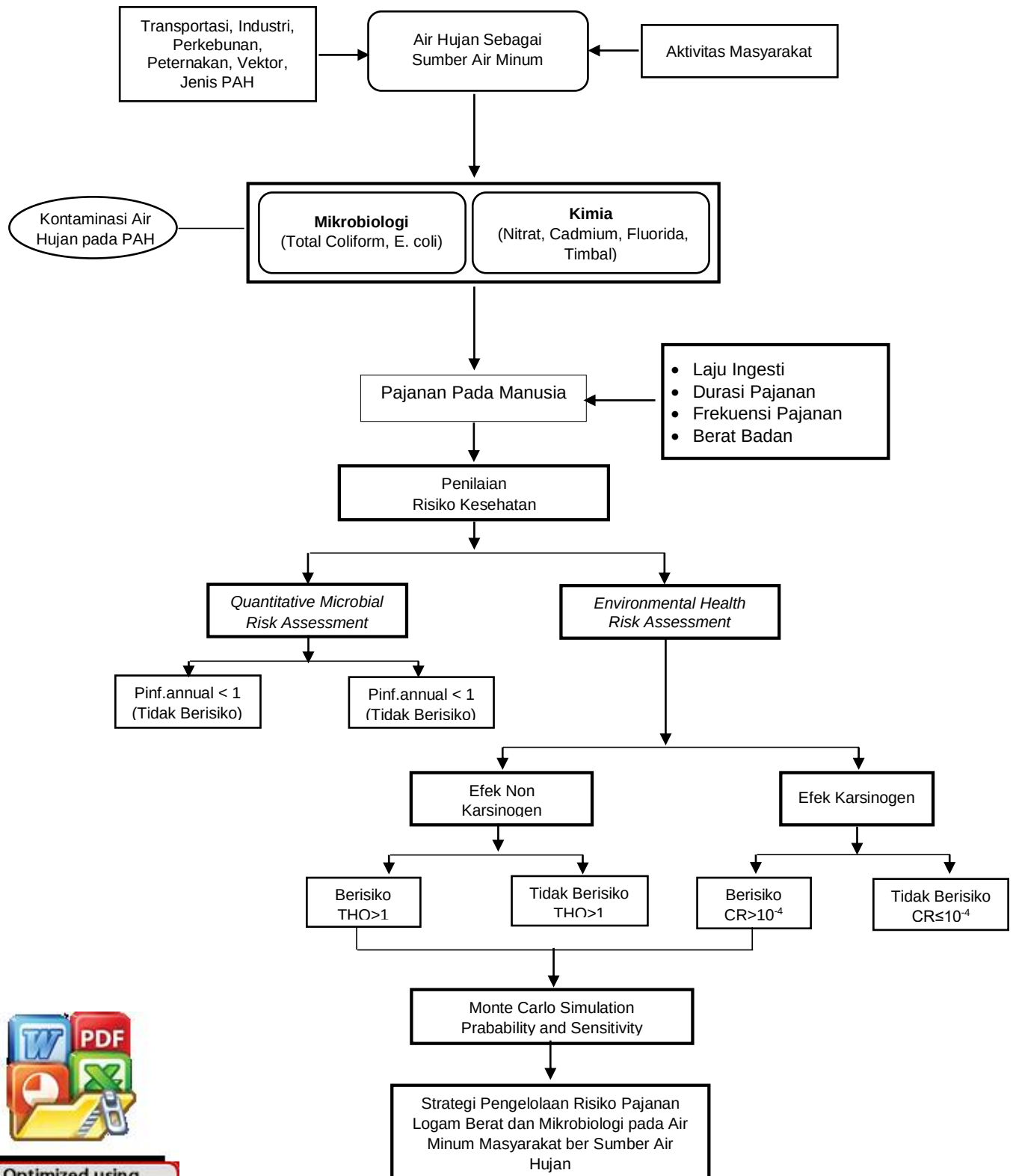
Gambar 2. Kerangka Teori Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan Mikroba (Sumber: ILSI, 2000; Mark Robson, 2007)

Modifikasi Alur Keseluruhan Karakterisasi Paparan langsung terhubung dengan Karakterisasi Efek Kesehatan Manusia, menciptakan keterkaitan erat antar kedua proses ini. Hubungan ini memperlihatkan bahwa paparan terhadap patogen langsung berdampak pada kesehatan manusia, dan analisis dosis-respon menjadi bagian penting dalam menghubungkan dan efek kesehatan.



1.8 Kerangka Konsep

Kerangka teori konsep dalam penelitian ini diuraikan sebagai berikut.



Gambar 3. Kerangka Konsep Penelitian

1.9 Definisi Operasional

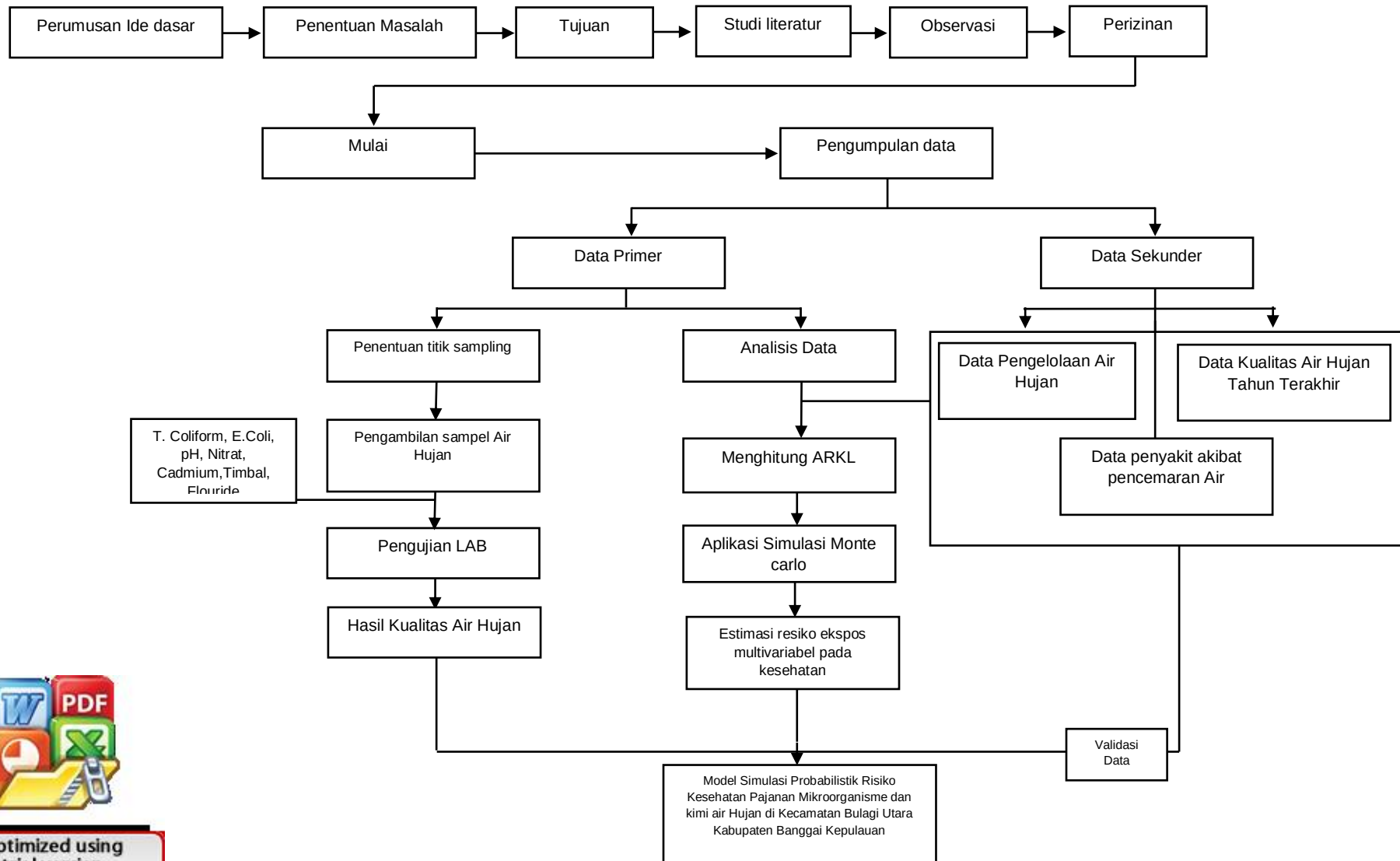
Variabel	Definisi Operasional	Satuan	Skala Pengukuran	Metode Pengukuran
Kontaminasi Mikrobiologi	Kehadiran Total Coliform dan E. coli pada air hujan	CFU/mL	Rasio	Metode MPN (Most Probable Number)
Kontaminasi Kimia	Kehadiran nitrat, kadmium, fluorida, dan timbal di air hujan.	mg/L	Rasio	Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS), Spektrofotometri, Ion Chromatography (IC)
Laju Ingesti	Jumlah air yang dikonsumsi atau tertelan oleh individu dalam periode tertentu.	L/hari	Rasio	Wawancara
Durasi Paparan	Lamanya waktu seseorang terpapar terhadap suatu zat (kimia atau biologis) dalam periode tertentu..	Tahun	Rasio	Wawancara
Frekuensi Paparan	Berapa kali seseorang terpapar kontaminan dalam satu tahun.	Hari/tahun	Rasio	Wawancara
Berat Badan	Ukuran massa tubuh individu yang digunakan sebagai faktor dalam perhitungan dosis paparan per kilogram berat badan.	kg	Rasio	Pengukuran langsung menggunakan timbangan
Efek Non-Karsinogenik	Dampak kesehatan yang tidak berpotensi menyebabkan kanker akibat paparan kontaminan.	Unitless	Interval	Analisis Doses-Respon
Efek Karsinogenik	Dampak kesehatan yang berpotensi menyebabkan kanker akibat paparan kontaminan.	Unitless	Interval	Analisis Doses-Respon



Monte Carlo Simulation	Pendekatan probabilistik untuk mengevaluasi ketidakpastian dalam penilaian risiko kesehatan akibat paparan kontaminan.	% atau probabilitas	Interval	-
Strategi Pengelolaan Risiko	Upaya untuk mengurangi dampak kesehatan dari paparan logam berat dan mikrobiologi dalam air hujan yang digunakan sebagai sumber air minum.	-	Nominal	-



1.10 Alur Penelitian



1.11 Daftar Pustaka

- Abdulla, F. A., & Al-Shareef, A. W. (2009). Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination*, 243(1–3), 195–207. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.013>
- Aberilla, J. M., Gallego-Schmid, A., Stamford, L., & Azapagic, A. (2020). Environmental assessment of domestic water supply options for remote communities. *Water Research*, 175, 115687. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115687>
- Ahmad, T., & Danish, M. (2018). Prospects of banana waste utilization in wastewater treatment: A review. *Journal of Environmental Management*, 206, 330–348. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.10.061>
- Ahmed, W., Gardner, T., & Toze, S. (2011). Microbiological Quality of Roof-Harvested Rainwater and Health Risks: A Review. *Journal of Environmental Quality*, 40(1), 13–21. <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0345>
- Al-Khatib, I. A., Al Zabadi, H., & Saffarini, G. (2017). Radon in harvested rainwater at the household level, Palestine. *Journal of Environmental Radioactivity*, 169–170, 192–196. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2017.01.014>
- Anuar, K., & Ahmad, A. (2015). *Kesehatan Masyarakat (Studi Kasus di Kecamatan Bangko Bagansiapiapi)*. 2, 32–39.
- Arifin. (2012). *Kualitas Bakteriologis Air Bersih*. <http://inspesisanitasi.blogspot.com/2012/01>. <http://inspesisanitasi.blogspot.com>
- Bae, S., Maestre, J. P., Kinney, K. A., & Kirsits, M. J. (2019). An examination of the microbial community and occurrence of potential human pathogens in rainwater harvested from different roofing materials. *Water Research*, 159, 406–413. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.029>
- Baguma, D., Loiskandl, W., Darnhofer, I., Jung, H., & Hauser, M. (2010). Knowledge of measures to safeguard harvested rainwater quality in rural domestic households. *Journal of Water and Health*, 8(2), 334–345. <https://doi.org/10.2166/wh.2009.030>
- C Morales-Figueroa, L A Castillo-Suárez, I Linares-Hernández, V. M.-M. & E. A. T.-S. (2023). Treatment processes and analysis of rainwater quality for human use and consumption regulations, treatment systems and quality of rainwater. *International Journal of Environmental Science and Technology*.
- Daoud, A. K., Swaileh, K. M., Hussein, R. M., & Matani, M. (2011). Quality assessment of roof-harvested rainwater in the West Bank, Palestinian Authority. *Journal of Water and Health*, 9(3), 525–533. <https://doi.org/10.2166/wh.2011.148>
- , C., Farahbakhsh, K., & Leidl, C. (2009). Assessment of rainwater quality from rainwater harvesting systems in Ontario, Canada. 117–134. <https://doi.org/10.2166/aqua.2009.013>



- Domènech, L., & Saurí, D. (2011). A comparative appraisal of the use of rainwater harvesting in single and multi-family buildings of the Metropolitan Area of Barcelona (Spain): Social experience, drinking water savings and economic costs. *Journal of Cleaner Production*, 19(6–7), 598–608. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.010>
- Donohue, M. J., Macomber, P. S. H., Okimoto, D., & Lerner, D. T. (2017). Survey of Rainwater Catchment Use and Practices on Hawaii Island. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 161(1), 33–47. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704x.2017.3250.x>
- Egodawatta, P., Thomas, E., & Goonetilleke, A. (2009). Understanding the physical processes of pollutant build-up and wash-off on roof surfaces. *Science of the Total Environment*, 407(6), 1834–1841. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.027>
- Franklin, L. J., Fielding, J. E., Gregory, J., Gullan, L., Lightfoot, D., Poznanski, S. Y., & Vally, H. (2009). An outbreak of Salmonella Typhimurium 9 at a school camp linked to contamination of rainwater tanks. *Epidemiology and Infection*, 137(3), 434–440. <https://doi.org/10.1017/S095026880800109X>
- García-Montoya, M., Bocanegra-Martínez, A., Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2015). Simultaneous design of water reusing and rainwater harvesting systems in a residential complex. *Computers and Chemical Engineering*, 76, 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.02.011>
- Hamdan, S. M. (2009). A literature based study of stormwater harvesting as a new water resource. *Water Science and Technology*, 60(5), 1327–1339. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.396>
- Hamilton, K. A., Ahmed, W., Palmer, A., Sidhu, J. P. S., Hodgers, L., Toze, S., & Haas, C. N. (2016). Public health implications of Acanthamoeba and multiple potential opportunistic pathogens in roof-harvested rainwater tanks. *Environmental Research*, 150, 320–327. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.06.017>
- Harsoyo, B. (2010). Teknik Pemanenan Air Hujan (Rain Water Harvesting) Sebagai Alternatif Upaya Penyelamatan Sumberdaya Air Di Wilayah Dki Jakarta. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 11(2), 29. <https://doi.org/10.29122/jstmc.v11i2.2183>
- Hart, C., & White, D. (2006). Water quality and construction materials in rainwater catchments across Alaska. *Journal of Environmental Engineering and Science*, 5(SUPPL. 1). <https://doi.org/10.1139/S05-026>
- Helmreich, B., & Horn, H. (2009). Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*, 248(1–3), 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.046>



- Huston, R., Chan, Y. C., Chapman, H., Gardner, T., & Shaw, G. (2012). Source apportionment of heavy metals and ionic contaminants in rainwater tanks in a subtropical urban area in Australia. *Water Research*, 46(4), 1121–1132. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.008>
- Islam, A., Akber, A., & Rahman, A. (2019). *Evaluation of harvested rainwater quality at primary schools of southwest coastal Bangladesh*.
- Iswanto, N., Husen, M., Dyah, A., Lestari, N., Fandeli, C., Studi, P., Lingkungan, T., Kimia, J., Papua, U., & Amban, G. S. (2022). KUALITAS AIR HUJAN DI DESA SIRONGO. 18(1), 25–35.
- Kharisma, R., Yudono, A., & Lopa, R. T. (2016). *Pemanfaatan rainwater harvesting (pemanenan air hujan) berbasis low impact development (studi kasus: kawasan pendidikan FT-UH Gowa)*.
- Koplan, J. P., Deen, R. D., Swanston, W. H., & Tota, B. (1978). Contaminated roof-collected rainwater as a possible cause of an outbreak of salmonellosis. *Journal of Hygiene*, 81(2), 303–309. <https://doi.org/10.1017/S0022172400025146>
- Kristianto, H. (2017). The Potency of Indonesia Native Plants as Natural Coagulant: a Mini Review. *Water Conservation Science and Engineering*, 2(2), 51–60. <https://doi.org/10.1007/s41101-017-0024-4>
- kuta and Hassan. (2014). *Domestic Water Sources and Its Health Implication in Lapai Local*. 7(6), 686–694.
- Lee, J. Y., Yang, J. S., Han, M., & Choi, J. (2010). Comparison of the microbiological and chemical characterization of harvested rainwater and reservoir water as alternative water resources. *Science of the Total Environment*, 408(4), 896–905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.001>
- Leong, J. Y. C., Chong, M. N., Poh, P. E., Hermawan, A., & Talei, A. (2017). Longitudinal assessment of rainwater quality under tropical climatic conditions in enabling effective rainwater harvesting and reuse schemes. *Journal of Cleaner Production*, 143, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.149>
- Mendez, C. B., Klenzendorf, J. B., Afshar, B. R., Simmons, M. T., Barrett, M. E., Kinney, K. A., & Kirisits, M. J. (2011). The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. *Water Research*, 45(5), 2049–2059. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.015>
- Nachshon, U., Netzer, L., & Livshitz, Y. (2016). Land cover properties and rain water harvesting in urban environments. *Sustainable Cities and Society*, 27, 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.08.008>
- ja, R., Muyanja, C. K., McGuigan, K. G., & Quilty, B. (2018). A study of the bacteriological quality of roof-harvested rainwater and an evaluation of SODIS as a suitable treatment technology in rural Sub-Saharan Africa. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3, 3648–3655. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.008>



- Nawaz, M., Han, M. Y., Kim, T., Manzoor, U., & Amin, M. T. (2012). Science of the Total Environment Silver disinfection of *Pseudomonas aeruginosa* and *E. coli* in rooftop harvested rainwater for potable purposes. *Science of the Total Environment*, *The*, 431, 20–25. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.022>
- Nor, S., Abdullah, F., Ismail, A., Juahir, H., Ahmad, R. B., Lananan, F., Hashim, N. M., Ariffin, N., Zali, M. A., Azman, T., Mohd, T., Hussin, H. F., Intan, R., Raja, S., Rizal, J., Jamil, A., & Desa, S. M. (2022). *Chemical composition of rainwater harvested in East Malaysia*. 27(2), 0–2.
- Oludairo, O. O and Aiyedun, J. O. (2015). Contamination of Commercially Packaged Sachet Water and the Public. *Bangl. J. Vet. Med*, 13(2), 73–81.
- Palla, A., Gnecco, I., & La Barbera, P. (2017). The impact of domestic rainwater harvesting systems in storm water runoff mitigation at the urban block scale. *Journal of Environmental Management*, 191, 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.025>
- Panas, A., Comouth, A., Saathoff, H., Leisner, T., Al-Rawi, M., Simon, M., Seemann, G., D??ssel, O., M??lhopt, S., Paur, H. R., Fritsch-Decker, S., Weiss, C., & Diabat??, S. (2014). Atmospheric Deposition: Sampling Procedures , Analytical Methods , and Main Recent Findings from the Scientific Literature. *Advances in Meteorology*, 5(1), 1590–1602.
- Park Won Bae. (2016). *Effective Improvement of Rainwater Management Facility*.
- Permenkes RI. (2023). Peraturan Menteri Kesehatan RI No 2 Tahun 2023 Tentang Peraturan Pelaksanaan PP No 66 Tahun 2014 Tentang Kesehatan Lingkungan. *Jdih.Kemkes.Go.Id*, 1–179.
- Public Health Corners. (2011). *Sanitasi total berbasis masyarakat*. <Http://Helpingpeopleideas.Com/Publichealth/Sanitasi-Total-Berbasis-Masyarakat-Stbm/>.
- Putranto, T. T., & Kusuma, K. I. (2009). PERMASALAHAN AIRTANAH PADA DAERAH URBAN. *Jurnal Teknik*, 30(1), 48–58.
- Rahaman, M. F., Jahan, C. S., & Mazumder, Q. H. (2019). Rainwater harvesting: Practiced potential for Integrated Water Resource Management in drought-prone Barind Tract, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*, 9(March), 100267. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100267>
- Sánchez, A. S., Cohim, E., & Kalid, R. A. (2015). A review on physicochemical and microbiological contamination of roof-harvested rainwater in urban areas. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 6, 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.swaqe.2015.04.002>
- E., Alexopoulos, A., & Leotsinidis, M. (2007). *Rainwater harvesting quality assessment and utilization in Kefalonia Island , Greece*. 41, 2039–2047. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.01.037>



- Sehgal, V. (2006). The Textbook of Clinical Dermatology. In 4. Jaypee Brother Medical Publisher.
- Susanto, D., Kalsum, T. U., & H, Y. S. (2014). Alat Penyaringan Air Kotor Menjadi Air Bersih. *Jurnal Media Infotama*, 10(2), 142–150.
- Taiwo, A. S., Adenike, K., & Aderonke, O. (2020). Efficacy of a natural coagulant protein from *Moringa oleifera* (Lam) seeds in treatment of Opa reservoir water, Ile-Ife, Nigeria. *Heliyon*, 6(1), e03335. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03335>
- Tamaddun, K., Kalra, A., & Ahmad, S. (2018). Potential of rooftop rainwater harvesting to meet outdoor water demand in arid regions. *Journal of Arid Land*, 10(1), 68–83. <https://doi.org/10.1007/s40333-017-0110-7>
- Untari, T., & Kusnadi, J. (2015). Pemanfaatan air Hujan sebagai air layak konsumsi di Kota Malang dengan metode modifikasi filtrasi sederhana. *Jurnal Pangan Dan Agroindustri*, 3(4), 1492–1502.
- Van der Sterren, M., Rahman, A., & Dennis, G. R. (2013). Quality and Quantity Monitoring of Five Rainwater Tanks in Western Sydney, Australia. *Journal of Environmental Engineering*, 139(3), 332–340. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ee.1943-7870.0000614](https://doi.org/10.1061/(asce)ee.1943-7870.0000614)
- Waso, M., Khan, S., & Khan, W. (2018). Microbial source tracking markers associated with domestic rainwater harvesting systems: Correlation to indicator organisms. *Environmental Research*, 161(November 2017), 446–455. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.043>
- WHO. (2000). *The world health report 2000: health systems: improving performance*.
- WHO. (2019). monitoring health for the SDGs, sustainable development goals. In *Progress in Retinal and Eye Research* (Vol. 8, Issue 3).
- Zhu, K., Zhang, L., Hart, W., Liu, M., & Chen, H. (2004). Quality issues in harvested rainwater in arid and semi-arid Loess Plateau of northern China. *Journal of Arid Environments*, 57(4), 487–505. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(03\)00118-6](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(03)00118-6)
- Zulkarnain, I., Raharjo, I., & Istanto, K. (2017). Rancang Bangun Alat Penjernih Air Berbasis Masyarakat Pedesaan dengan Konsep Rucef (Re Use, Cheap, Easy And Flexible) Water Purification Equipment Design Based On The Rural Communities With Concept Rucef (Re Use, Cheap, Easy And Flexible). *TekTan Jurnal Ilmiah Teknik Pertanian*, 5, 135–202.



BAB II TOPIK PENELITIAN I

Konsentrasi Paparan Mikrobiologi dan Kimia serta Risiko Kesehatan Non-Karsinogenik dan Karsinogenik pada Penduduk di Kecamatan Bulagi Utara

2.1 Abstrak

Air hujan merupakan sumber air yang vital di wilayah kepulauan, termasuk di Kecamatan Bulagi Utara, Kabupaten Banggai Kepulauan. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kualitas air hujan yang ditampung dan menganalisis risiko kesehatan akibat kontaminasi mikrobiologi dan kimia. Parameter yang dianalisis meliputi Total Coliform, *E. coli*, Nitrat (NO₃), Kadmium (Cd), Timbal (Pb), dan Fluorida (F). Dengan menggunakan pendekatan Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL) dan Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA), penelitian ini memberikan gambaran komprehensif tentang risiko kesehatan yang dihadapi masyarakat.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kontaminasi mikrobiologi, terutama Total Coliform, melebihi ambang batas di seluruh titik sampel, dengan nilai tertinggi di Titik VIII (2.600 CFU/100 ml). Parameter kimia umumnya masih dalam batas aman, namun konsentrasi Nitrat di beberapa lokasi mendekati ambang batas, khususnya di Titik II (11,8 mg/L). Analisis risiko kesehatan mengungkapkan bahwa kelompok anak-anak memiliki potensi risiko non-karsinogenik yang lebih tinggi akibat paparan Fluorida, sementara risiko karsinogenik dari Kadmium dan Timbal masih dalam ambang yang dapat ditoleransi.

Kesimpulan penelitian ini menekankan perlunya pemantauan kualitas air hujan secara berkala dan penerapan strategi mitigasi, seperti sistem pengelolaan air awal (first flush), filtrasi, dan disinfeksi, untuk memastikan keamanan air yang dikonsumsi masyarakat. Pendekatan terintegrasi ini memberikan dasar yang kuat bagi pengambilan kebijakan kesehatan lingkungan yang lebih efektif.

Kata Kunci: Air hujan, risiko kesehatan, Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL), Paparan Mikrobiologi, Paparan Kimia

2.2 Pendahuluan

Kualitas air hujan tergantung dari besar dan lamanya curah hujan sedangkan kualitas air hujan adalah dapat dilihat dari keadaan apakah belum tercemar (terkontaminasi) karena air hujan merupakan air murni

api air hujan yang turun ke bumi biasanya mengandung bakteri, nur, debu, atau kotoran-kotoran lainnya yang ada di udara serta air hujan pada waktu awal terjadinya hujan. *Rainwater Harvesting*



System (RWHS) merupakan sistem alternatif penyedia air bersih dengan memanen air hujan. Dalam memanfaatkan air hujan terdapat portable dan non portable. Terdapat dua teknik pengumpulan air hujan, yaitu teknik roof top rain water harvesting (pemanenan air hujan dengan atap bangunan), dan teknik surface rain water harvesting (pemanenan air hujan di aliran permukaan) dengan bangunan reservoir (Harsoyo, 2010).

Pemanenan air hujan (PAH) merupakan cara yang berkelanjutan untuk menyediakan air yang telah berhasil diterapkan di masyarakat di seluruh dunia. Sistem PAH digunakan di daerah dengan tingkat curah hujan tinggi dalam rangka mengurangi jumlah limpasan permukaan yang terjadi selama curah hujan. Penurunan limpasan dapat menurunkan risiko banjir lokal sementara, juga mengurangi biaya dan penggunaan energi yang berkaitan dengan penanggulangan stormwater. PAH juga sangat sesuai bagi masyarakat dengan siklus tahunan musim basah dan kering karena hujan memungkinkan untuk ditangkap dan disimpan ketika peralihan musim terjadi. (Park Won Bae, 2016)

Polutan merupakan gas, debu atau partikel yang mengandung logam berat, hidrokarbon aromatik polisiklik, dioksin, furan, sulfat, nitrat, dan lainnya (Sánchez et al., 2015). Jumlah polutan di udara bervariasi tergantung jumlah industri dan kepadatan lalu lintas, serta dipengaruhi oleh faktor-faktor meteorologis (kecepatan angin, suhu, kelembaban relatif), dan karakteristik partikel (ukuran dan bentuk)(García-Montoya et al., 2015)(Helmreich & Horn, 2009)

Banyaknya polutan di lingkungan perkotaan bervariasi sesuai dengan intensitas lalu lintas jalan dan kedekatan dengan industri. Kehadiran polutan di atmosfer akan terbawa air hujan, dan selanjutnya menjadi sumber pencemar pada tangki air (Sánchez et al., 2015).

Selain mengalami perpindahan, polutan juga mengalami deposisi mekanisme fisikokimia. Deposisi atmosfer adalah transfer polutan atmosfer ke ekosistem darat dan perairan(Panas et al., 2014)(Sánchez 2015). Polutan mengalami deposisi kering (dry deposition) dan



deposisi basah (wet deposition). Deposisi kering gas dan partikel dari atmosfer tidak dipengaruhi oleh presipitasi, terjadi karena adanya gerakan ke bawah dari lapisan atmosfer ke permukaan bumi. Deposisi kering sangat dipengaruhi oleh keadaan atmosferik, ukuran partikel, dan sifat absorpsi (Panas et al., 2014) (Helmreich & Horn, 2009) (Lee et al., 2010) (Leong et al., 2017) (Mendez et al., 2011) (Rahaman et al., 2019) (Zhu et al., 2004). Deposisi basah polutan dalam bentuk gas dan partikulat terjadi karena terlarut dalam air hujan, sering disebut sebagai pencucian atmosfer, melalui mekanisme rainout dan washout. Rainout terjadi bila partikulat menjadi inti awan dalam proses terjadinya hujan, sedangkan washout adalah pencucian polutan oleh air hujan, terjadi di bawah awan. Dengan adanya proses pencucian polutan, maka ditemukan senyawa kimia dalam air hujan. Air hujan menangkap polutan udara dan memindahkannya ke tanah, sehingga atmosfer menjadi lebih bersih setelah hujan (Helmreich & Horn, 2009) (Lee et al., 2010) (Rahaman et al., 2019) (Sánchez et al., 2015) (Zhu et al., 2004).

Pencucian udara terjadi dengan cepat, sehingga proses ini hampir tidak bergantung pada intensitas dan volume curah hujan. Deposisi atmosfer memberikan kontribusi penting terhadap kontaminasi air hujan, biasanya nitrogen, padatan tersuspensi, phosphor, karbon organik terlarut, dan logam berat (Panas et al., 2014) (Sánchez et al., 2015).

Pengalaman dari berbagai laporan penelitian menyimpulkan bahwa air hujan yang dipanen harus diolah sebelum digunakan untuk keperluan minum. Selain itu, klorinasi dalam tangki penyimpanan, pembersihan permukaan bidang tangkapan dan saluran secara berkala, harus dilakukan untuk meminimalkan akumulasi kotoran. Kepatuhan terhadap praktik-praktik ini merupakan faktor kunci untuk menghindari penurunan kualitas air hujan selama tahap penyimpanan, terutama kontaminasi mikroorganisme.

et al., 1978) (Nalwanga et al., 2018) (Palla et al., 2017) (Waso et al.,



Air Minum adalah air yang melalui pengolahan atau tanpa pengolahan yang memenuhi syarat kesehatan dan dapat langsung diminum. Air Minum digunakan untuk keperluan untuk keperluan minum, masak, mencuci peralatan makan dan minum, mandi, mencuci bahan baku pangan yang akan dikonsumsi, peturasan, dan ibadah. Standar baku mutu kesehatan lingkungan media Air Minum dituangkan dalam parameter yang menjadi acuan Air Minum aman. Parameter yang dimaksud meliputi parameter fisik, parameter mikrobiologi, parameter kimia serta radioaktif. Dalam Peraturan Menteri parameter dibagi menjadi parameter utama dan parameter khusus. Penetapan tambahan parameter khusus menjadi tanggung jawab pemerintah daerah melalui kajian ilmiah. Standar baku mutu kesehatan lingkungan media Air Minum ini sebagai acuan bagi penyelenggara Air Minum, petugas sanitasi lingkungan di Puskesmas, dinas kesehatan provinsi, dinas kesehatan kabupaten/kota, dan pemangku kepentingan terkait. Upaya penyehatan dilakukan melalui pengamanan dan pengendalian kualitas Air Minum yang bertujuan untuk meningkatkan kualitas Air Minum memberikan manfaat yang signifikan bagi kesehatan masyarakat.

Sasaran untuk penetapan standar baku mutu kesehatan lingkungan media Air Minum diperuntukkan bagi penyelenggara dan produsen/penyedia/ penyelenggara Air Minum yang dikelola dengan jaringan perpipaan, bukan jaringan perpipaan, dan komunal, baik institusi maupun non institusi di Permukiman, Tempat Kerja, Tempat Rekreasi serta Tempat dan Fasilitas Umum. Sasaran tersebut di atas harus memeriksakan seluruh parameter wajib. (Permenkes RI, 2023)

Pada penelitian ini parameter yang menjadi pembahasan pencemaran sumber air minum masyarakat di Kecamatan Bulagi Utara adalah parameter kimia yaitu pH, Nitrat (NO_3), Kadmium (Cd), Timbal (Pb), (F) dan parameter mikrobiologi yaitu Total coliform dan E. coli indikator lingkungan membantu melacak perubahan dalam an dengan memilih langkah-langkah utama, yang dapat berupa



fisik, kimia, biologis, atau sosial ekonomi yang kemudian memberikan informasi berguna tentang keseluruhan sistem. Penting untuk mengevaluasi kondisi fundamental lingkungan menggunakan indikator tanpa harus menangkap kompleksitas penuh dari sistem (Muralikrishna & Manickam, 2017). Penilaian risiko merupakan *tool* pengelolaan risiko yang diklasifikasikan dalam bentuk karakterisasi efek-efek yang berpotensi merugikan kesehatan dan lingkungan di sekitar manusia (Anand, 2016). Analisis ini dimulai dengan menilai, mengatur, menentukan dan mengkomunikasikan risiko.

ARKL tidak dimaksudkan untuk mencari indikasi atau menguji hubungan atau pengaruh dampak lingkungan terhadap kesehatan (kejadian penyakit yang berbasis lingkungan) melainkan untuk menghitung atau menaksir risiko yang telah, sedang dan akan terjadi. Efek tersebut, yang dinyatakan sebagai nilai kuantitatif dosis-respon, harus sudah ditegakkan lebih dahulu, yang didapat dari luar sumber-sumber populasi yang dipelajari, bahkan dari studi-studi toksisitas uji hayati (bioassay) atau studi keaktifan biologis *risk agent*. ARKL dalam besaran risiko (dinyatakan sebagai RQ untuk non- karsinogenik dan ECR untuk karsinogenik) tidak dibaca sebagai per-bandingan lurus (*directly proportional*) melainkan sebagai probabilitas.

1. Konsep dan Definisi ARKL

Penilaian risiko kesehatan manusia didefinisikan oleh Badan Perlindungan Lingkungan Amerika Serikat (US-EPA) sebagai proses untuk memperkirakan sifat dan kemungkinan pada efek kesehatan yang merugikan pada manusia yang mungkin terpapar bahan kimia di media lingkungan yang terkontaminasi. Sekarang atau di masa depan analisis risiko digunakan untuk memberikan informasi mengenai desain keputusan (misalnya keamanan dan kinerja biaya, dan lain-lain) serta keputusan operasional (harus mematikan sebuah fasilitas yang mengganggu). Selain itu berfungsi untuk mengoptimalkan keputusan yang dibuat oleh sistem dan pemilik/operator serta cara yang



paling mendekati atau terbaik dalam memodelkan interdependensi dan ketidakpastian tentang keadaan sistem sekarang (Anwar Daud, 2016).

Zat kimia beracun, patogen dan radiasi elektromagnetik menjadi ancaman utama di lingkungan. PHA (*Public Health Assessment*) adalah perangkat yang dibuat oleh *Agency for Toxic Substances and Drug Registry* (ATSDR). Fungsi PHA adalah evaluasi data dan informasi mengenai pelepasan bahan-bahan berbahaya ke lingkungan untuk menilai setiap dampak (yang lalu, kini, atau yang akan datang) terhadap kesehatan masyarakat, mengembangkan anjuran-anjuran kesehatan dan rekomendasi-rekomendasi lain, dan mengidentifikasi kajian-kajian atau tindakan yang dibutuhkan untuk mengevaluasi dan meniadakan atau mencegah efek-efek terhadap kesehatan manusia (ATSDR, 2005).

Risiko lingkungan adalah risiko yang muncul akibat keadaan lingkungan secara fisik, kimia, biologi dan sosiokultural. Penilaian risiko adalah salah satu komponen dalam proses pengambilan keputusan yang digunakan dalam mengatasi kontaminan lingkungan yang menjadi perhatian kesehatan manusia. Faktor ilmiah, teknis, dan kebijakan lainnya, selain hasil penilaian risiko kesehatan manusia, juga dipertimbangkan dalam membuat manajemen risiko (Anna M. Fan, George Alexeeff, 2015). Manajemen risiko harus mengimplementasikan langkah yang sesuai dengan jenis risiko di wilayah tinggal penduduk/lingkungan yang berisiko. Dalam hal risiko, kerentanan anak-anak terhadap pajanan dari polusi di lingkungan lebih tinggi daripada orang dewasa (Environmental Protection Agency (EPA), 2000). Hal ini karena perbedaan toksikodinamika polutan dalam tubuh mereka dalam hal penyerapan, metabolisme dan ekskresi.

2. Prinsip Penilaian Pajanan



Besar risiko kesehatan akibat pajanan bahaya yang ada di lingkungan dapat dijelaskan oleh studi Epidemiologi Kesehatan Lingkungan (EKL) dan Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan (ARKL)

(Mallongi, A., & Dullah, 2014). Pada ARKL, agen risiko yang diterima setiap individu bisa dihitung berdasarkan *intake* (asupan), sedangkan EKL tidak perlu memperhitungkan hal tersebut. EKL ditentukan berdasarkan kejadian penyakit (*disease oriented*) dan kondisi lingkungan yang spesifik, diukur dengan melihat nilai *Odd Ratio* (OR) yaitu berapa kali faktor risiko menyebabkan penyakit bagi kelompok terpapar daripada kelompok yang tidak terpapar, *Risk Ratio* (RR) yaitu melihat berapa kali kemungkinan orang-orang yang terpapar faktor risiko untuk menderita penyakit apabila dibandingkan orang yang tidak terpapar faktor risiko dan *Standardized Mortality Ratio* (SMR) yang diperoleh dari populasi yang dianalisis.

Besaran risiko dalam ARKL adalah RQ untuk non-karsinogenik dan ECR untuk karsinogenik dan dinyatakan sebagai probabilitas, sedangkan EKL merumuskan proporsi gejala atau penyakit dan tingkat pencemaran. Penilaian risiko memberikan pendekatan sistematis untuk mengkaraktirasi sifat dan besarnya risiko yang terkait dengan bahaya kesehatan lingkungan. Semua aktivitas, proses, dan produk memiliki tingkat risiko tertentu. Misalnya pada studi kuantifikasi akurat dari risiko yang ditimbulkan oleh logam sangat penting untuk mengembangkan strategi manajemen risiko yang efektif untuk melindungi lingkungan perkotaan (Haller, B., Ulm, K., & Hapfelmeier, 2019).

Langkah selanjutnya dalam penilaian risiko adalah pemilihan dan analisis data tentang efek racun (merugikan) dari suatu senyawa. Sebagian besar data biasanya berasal dari hewan percobaan, karena hewan mamalia mencerminkan kompleksitas organisme mamalia yang utuh (Schrenk, 2018).

Pada studi hewan, tes kronis selama tiga bulan hingga masa hidup hewan digunakan untuk memperoleh data tentang ambang batas dan respons fraksional. Karena dosis ditingkatkan secara terus-menerus dan karena seluruh populasi tidak diuji, dosis ambang batas yang sebenarnya tidak dapat diamati. Jika data NOAEL digunakan



untuk analisis kuantitatif distribusi struktur kimia yang terkait dengan kelompok NOAEL, kriteria seleksi yang jelas dan prosedur transformasi yang memungkinkan untuk desain penelitian dan parameter basis data per senyawa tersedia (Zarn, J. A., Hänggi, E., & Engeli, 2015). NOAEL dipilih sebagai asumsi bahwa jika efek toksik kritis dicegah, maka semua efek toksik dicegah (US EPA, 2009). NOAEL untuk efek toksik kritis tidak boleh disamakan dengan "level tanpa efek yang diamati" (NOEL). NOEL sesuai dengan tingkat paparan di mana tidak ada efek sama sekali telah diamati; efek diamati itu tidak dianggap memiliki signifikansi toksikologis. Proses penilaian risiko adalah seni dan juga sains. Proses berkembang pesat dan digunakan pada berbagai potensi kegunaan dan intervensi. Dengan pemahaman yang kuat tentang kerangka proses, asumsi yang digunakan dalam analisis risiko dan komitmen untuk mengkomunikasikan proses secara penuh dan adil, penilaian risiko dapat menjadi alat yang sangat berharga dalam mendukung rencana perbaikan pada lokasi yang tercemar (Scoullous, M. J., Plass, W., Thornton, I., Makuch, Z., & Müller, 2001).

Kerangka kerja QMRA digunakan untuk memperkirakan risiko penyakit bawaan makanan yang diberikan variabel seperti konsentrasi patogen, tingkat konsumsi produk, dan data dosis-respons untuk populasi yang terpapar. Aplikasi QMRA digunakan untuk tujuan keamanan pangan dalam rangkaian terbatas sumber daya yang dapat membantu dalam mengelola risiko kesehatan masyarakat dari patogen bawaan makanan (Kundu et al., 2018).

World Health Organization (WHO) mendefinisikan analisis risiko sebagai proses yang dimaksudkan untuk menghitung atau memperkirakan risiko pada suatu organisme sasaran, sistem, atau populasi, termasuk identifikasi ketidakpastian yang menyertainya, paparan oleh agen tertentu dengan memperhatikan karakteristik yang melekat pada penyebab (agen) yang sedang dikaji



dan karakteristik system sasaran yang spesifik. Risiko sendiri didefinisikan sebagai kebolehjadian (probabilitas) suatu efek yang merugikan pada suatu organisme, sistem, sub populasi yang disebabkan oleh pemajanan suatu agen dalam keadaan tertentu (Mallongi, A., & Dullah, 2014).

Analisis risiko adalah alat yang berharga dalam pengelolaan masalah keamanan pangan mikroba dan dapat memberikan pendekatan sistematis bagi otoritas pengawas dan industri makanan untuk mengendalikan risiko yang ditimbulkan oleh patogen dalam komoditas pangan tertentu. Analisis risiko terdiri dari tiga elemen: penilaian risiko, manajemen risiko dan komunikasi risiko. Penilaian risiko adalah bagian ilmiah dari proses dimana bahaya diidentifikasi dan risiko yang ditimbulkan oleh bahaya tertentu (mis. Patogen) dihitung. Prinsip-prinsip penilaian risiko termasuk empat tahap yang terlibat (identifikasi bahaya, penilaian paparan, karakterisasi bahaya dan karakterisasi risiko) diuraikan oleh Codex Alimentarius Commission (World Health Organization meeting report, 2009). Dalam Microbial Risk Assessment Guideline, dijelaskan langkah langkah membuat manajemen risiko mikroba yaitu, dengan merumuskan masalah dalam konteks yang luas (planning and scoping), menganalisis risiko (risk assessment), menentukan pilihan prioritas risiko (risk characterization), membuat keputusan yang tepat, mengambil tindakan untuk melaksanakan keputusan dan melakukan evaluasi terkait efektivitas tindakan yang diambil (EPA, 2012).

2.3 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis tingkat konsentrasi bakteriologi (Total Coliform, *Escherichia coli*) dan konsentrasi kimia (Nitrat , Kadmium , Timbal , dan Fluorida) pada penampungan air hujan di Kecamatan Bulagi Utara.



ghitung tingkat risiko kesehatan non-karsinogenik pada penduduk at paparan Total Coliform, *Escherichia coli*, Nitrat , Kadmium ,

Timbal , dan Fluorida dengan menggunakan pendekatan Target Hazard Quotient dan Target Cancer Risk di Kecamatan Bulagi Utara.

3. Menghitung tingkat risiko kesehatan karsinogenik pada penduduk akibat paparan Total Coliform, Escherichia coli, Nitrat , Kadmium , Timbal , dan Fluorida dengan menggunakan pendekatan Target Hazard Quotient dan Target Cancer Risk di Kecamatan Bulagi Utara.

2.4 Metode Penelitian

2.4.1 Penilaian Paparan Mikrobiologi dan Paparan Kimia

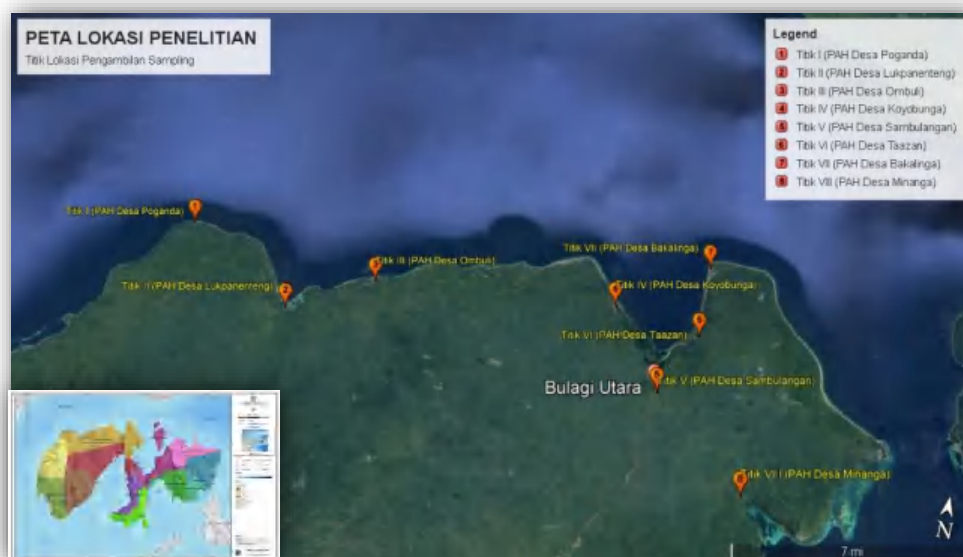
Penelitian ini merupakan penelitian Observasional Study yaitu dengan memeriksakan sampel uji di Laboratorium Penguji Balai Besar Laboratorium Kesehatan Makassar (BBLK) terhadap parameter kualitas air (Air Hujan) yang di ukur meliputi paramater mikroorganisme dan parameter kimia. Pengambilan sampel dilakukan pada 8 titik pengambilan sampel air hujan pada penampungan air hujan (PAH) yang tersebar di wilayah Kecamatan Bulagi Utara yang dapat dilihat pada tabel 3 berikut ini :

Tabel 2
Lokasi Penampungan Air Hujan

Lokasi Sampel	Koordinat	
	Latitude	Longitude
Titik I	-1.181233°	122.911060°
Titik II	-1.215819°	122.969282°
Titik III	-1.194097°	123.007319°
Titik IV	-1.183082°	123.121912°
Titik V	-1.221350°	123.146446°
Titik VI	-1.190641°	123.162443°
Titik VII	-1.154023°	123.163996°
Titik VIII	-1.260053°	123.186937°

Sumber : Data Primer, 2024





Gambar 4. Lokasi Penampungan Air Hujan di Kecamatan Bulagi Utara Kabupaten Banggai Kepulauan

2.4.2 Tingkat risiko kesehatan non-karsinogenik dan Karsinogenik pada penduduk.

Metode ARKL (Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan) dan QMRA (*Quantitative Microbial Risk Assessment*) adalah dua pendekatan yang digunakan untuk mengevaluasi risiko terhadap kesehatan manusia dari paparan bahan kimia dan mikroba. Berikut penjelasan tentang kedua metode ini :

1. Langkah Penilaian Risiko Kesehatan
 - a. Identifikasi Bahaya (*Hazard Identification*)

Bahaya adalah sumber segala potensi kerusakan, bahaya, atau efek kesehatan yang merugikan pada sesuatu atau seseorang. Identifikasi bahaya adalah kegiatan untuk menentukan jenis dan kapasitas agen untuk menyebabkan efek samping pada kesehatan manusia dan hewan lainnya (Muralikrishna & Manickam, 2017). Mengumpulkan kasus sebelumnya dan data gejala penyakit yang berkaitan dengan toksisitas agen risiko juga merupakan bagian dari identifikasi bahaya dan dikenal sebagai *disease oriented*. Dalam analisis risiko, beberapa data yang diperlukan dalam identifikasi bahaya diantaranya adalah sejarah lokasi, tataguna lahan, tingkat



pencemaran dalam media, karakteristik lingkungan yang mempengaruhi laju dan keberadaan zat kimia kontaminan tersebut serta pengaruh potensial terhadap populasi (Mallongi, A., & Dullah, 2014).

b. Analisis Paparan (Exposure Assessment)

Paparan adalah kontak suatu organisme (merujuk ke manusia dalam hal penilaian risiko kesehatan) dengan agen kimia atau fisik (USEPA, 1992). Pada penilaian paparan, informasi dikumpulkan tentang jumlah zat kontaminan, bagaimana paparan tersebut dapat terjadi, jalur paparan (inhalasi, dermal, ingesti), dan untuk berapa lama paparan tersebut akan terjadi (EPA, 2010). Penilaian paparan berfungsi untuk menentukan sub populasi yang berisiko terpapar terhadap bahaya yang teridentifikasi. Korelasi mengenai frekuensi dan besarnya paparan individu dalam populasi dan kerentanannya juga ditentukan di fase ini (Anwar Daud, 2016).

1) Jalur Ingesti

Data dan informasi yang dibutuhkan untuk menghitung asupan jalur oral adalah semua variabel di persamaan sebagai berikut :

$$I = \frac{C \times R \times tE \times fE \times Dt}{Wb \times t_{avg}}$$

Keterangan :

- I : Intake (Asupan) (mg/m³/hari)
- C : Konsentrasi risk agent mg/m³ untuk medium udara, mg/L untuk air minum, mg/kg untuk makanan atau pangan
- R : laju (rate) asupan atau konsumsi, m³/jam untuk inhalasi, L/Hari untuk air minum, gr/hari untuk makanan.
- tE : Waktu paparan tahunan
- fE : Frekuensi paparan
- Dt : Durasi paparan (Tahun)
- Wb : Berat Badan
- t_{avg} : Periode waktu rata-rata (30x365 hari/tahun untuk zat non karsinogen, 70 tahun x 365 hari/tahun untuk zat karsinogen)



Hampir seluruh jenis polutan yang berasal dari industri memiliki efek nonkarsinogenik dan karsinogenik. Logam berat merupakan spesifik yang memiliki risiko karsinogenik yang tinggi. Pada tahapan ini pertanyaan agen risiko spesifik apa yang berbahaya harus terjawab, di media lingkungan yang mana agen risiko terakumulasi, seberapa besar kandungan/konsentrasi agen risiko di media lingkungan, gejala kesehatan apa yang potensial.

Tabel 3. Aspek penting dan perlu diperhatikan dalam analisis pajanan

No	Aspek	Keterangan
1	Agen	Biologi, kimia, fisika, agen tunggal, berganda dan campuran
2	Sumber	Antropogenik/nonantropogenik, area/titik, bergerak/diam, indoor/outdoor
3	Media Pembawa	Udara, air, tanah, debu, makanan dan produk
4	Jalur paparan	Menghirup udara yang terkontaminasi, menelan makanan yang terkontaminasi, menyentuh permukaan benda.
5	Konsentrasi pajanan	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ (udara), mg/kg (makanan), mg/L (air), % berat
6	Rute pajanan	Inhalasi, kontak kulit (dermal), ingesti, rute berganda
7	Durasi	Detik, menit, jam hari, waktu, bulan, tahun, seumur hidup
8	Frekuensi	Kontinu, intermiten, bersiklus, acak
9	Latar paparan	Pemukiman, bukan pemukiman, lingkungan kerja/bukan lingkungan kerja, indoor/outdoor
10	Populasi terpapar	Populasi umum, sub populasi, individu
11	Geografis	Tempat/sumber spesifik, lokal, regional, nasional, internasional, global
12	Kurun waktu	Masa lalu, sekarang, masa depan, tren



c. Analisis Dosis-Respon (*Dose-Response Analysis*)

Toksistas suatu bahan kimia dinyatakan sebagai dosis referensi atau *reference dose* (RfD). Kemudian untuk efek karsinogenik dinyatakan dalam *Cancer Unit Risk* (CCR) dan efek non karsinogenik dalam *Cancer Slope Factor* (CSF). Untuk menghitung dosis yang relevan dengan EHRA, perlu dilakukan penskalaan dosis untuk mengubah dosis yang digunakan pada hewan menjadi dosis yang setara dengan manusia (*human equivalent dose*) atau konsentrasi setara manusia (*human concentration dose*). Informasi mengenai dosis respon berasal dari sumber data Integrated Risk Information System (IRIS) untuk setiap agen kimia di website resmi mereka (www.epa.gov/iris).

Keberadaan efek toksik akut mengindikasikan bahwa konsentrasi racun dalam organisme telah berubah dengan cepat. Beberapa racun menyebabkan respon yang langsung terlihat segera setelah kontak dengan tubuh (Mikko Nikinmaa, 2014). Namun beberapa diperoleh respons berbeda di pemaparan organisme dengan efek jangka pendek dan jangka panjang terhadap racun tertentu. akhir atau organ target yang lebih sensitif biasanya harus diketahui atau ditentukan karena pada saat melakukan manajemen risiko, diperlukan perlindungan target kepada organ yang paling sensitif sehingga akan melindungi organ lainnya (Schrenk, 2018).

Potensi dampak kesehatan dari logam ditandai sebagai risiko kesehatan non-kanker dan kanker, berdasarkan penilaian pajanan. Potensi risiko non-kanker dapat dievaluasi menggunakan Hazard Quotient (HQ) dan Hazard index (HI). Hazard Quotient adalah rasio asupan harian logam tertentu terhadap dosis referensi spesifiknya (RfD) (Ma, Y., Egodawatta, P., McGree, J., Liu, A., & Goonetilleke,

3). Setelah mengetahui intake berdasarkan jalur inhalasi dan ingesti, langkah selanjutnya adalah menghitung tingkat risiko (RQ) dan akan dilanjutkan pada langkah karakterisasi risiko.



d. Karakteristik Risiko (*Risk Characterization*)

Karakterisasi risiko merupakan suatu kesimpulan awal dari seluruh proses penilaian risiko kesehatan. Karakterisasi risiko mencakup estimasi berupa kemungkinan dari efek pada populasi manusia yang terdampak berdasarkan identifikasi bahaya, dosis-respon dan informasi pajanan (Berglund, M., Elinder, C. G., & Järup, 2001). Komponen penting dalam karakterisasi risiko dan bahaya dari jejak logam tergantung keberadaan dan penggunaannya. Jika penggunaan logam tersebut terbatas, maka informasi tentang bahaya dan pajanan mengenai efek samping dan risiko sulit dilakukan. Untuk logam yang sering digunakan, estimasi risiko kuantitatif dimungkinkan. Biasanya didukung oleh informasi mode tindakan atau *mode of action* (MOA), model toksikokinetik dan toksikodinamik (TKTD) dan jalur yang merugikan atau *adverse outcome pathway* (AOP) (USEPA, 1992). Ketika penilaian risiko dan karakterisasi risiko menunjukkan adanya risiko yang berbahaya, manajemen risiko perlu dilakukan. Teknologi kontrol dengan resin penukar ion, sistem filter scrubbing untuk mengurangi partikel yang mengandung logam di udara merupakan contoh konkret langkah untuk mengurangi pajanan logam berat.

Estimasi risiko dan ringkasan informasi biologis yang relevan, asumsi yang digunakan, keterbatasannya, serta diskusi tentang variabilitas dan ketidakpastian dalam penilaian risiko, digunakan dalam manajemen risiko. Untuk menentukan tingkat pencemaran dalam media lingkungan seperti air, tanah dan udara maka diperlukan data tentang konsentrasi polutan tersebut dan data benchmark dose yang berasal dari NOAEL, EPA ataupun ATSDR. Adapun perhitungan risiko ekologis tersebut dinyatakan dengan rumus :

$$HQ = \frac{C}{\text{Benchmark dose}}$$

eterangan :

C = Konsentrasi polutan, data berasal dari pengujian lab
 benchmark dose = Konsentrasi standar



Pada penentuan risiko paparan polutan pada manusia, setelah mengetahui nilai intak, langkah berikutnya adalah menghitung tingkat risiko (RQ) terhadap responden berdasarkan risiko harian, mingguan dan tahunan. Penentuan risiko harian dan tahunan dari paparan zat kimia adalah sebagai berikut :

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

1) Penentuan Risiko Harian

Dosis acuan (RfD) untuk setiap unsur diperoleh dari USEPA, ATSDR ataupun standar nasional dari masing-masing negara. Nilai intake diperoleh berdasarkan nilai asupan pada persamaan inhalasi dan ingesti. Pada penentuan risiko zat karsinogenik, rumus yang digunakan adalah sebagai berikut :

$$ECR = Intake \times SF$$

Nilai SF diperoleh dari USEPA dan ATSDR yang merupakan nilai dari unsur yang tergolong karsinogenik seperti logam berat.

2) Penentuan Risiko Tahunan

Metode untuk estimasi *Target Hazard Quotient* (THQ) terjadi ketika seseorang mengonsumsi ataupun menghirup zat yang terkontaminasi pada suatu bahan makanan atau kontaminan toksik tertentu yang bersifat non-karsinogenik dan karsinogenik (Kayame et al., 2013).

$$THQ = \frac{EF \times ED \times FIR \times C}{RfD \times Bw \times AT} \times 10^{-3}$$

Keterangan :

EF	: Frekuensi paparan (365 hari/tahun)
ED	: Durasi paparan (70 tahun)
FIR	: Laju asupan (gram/individu/hari)
C	: Konsentrasi Logam
RfD/RfC	: Dosis acuan
Bw	: Bobot Tubuh (Kg)
AT	: rata-rata waktu paparan untuk non-karsinogenik (365 hari/tahun x ED)



Pada risiko paparan dari zat karsinogenik, dibutuhkan nilai Cancer Slope Factor (CSF) pada masing-masing unsur. Nilai ini merupakan default dan setiap unsur yang berpotensi menimbulkan

$$TcR = \frac{EF \times ED \times FIR \times C \times CSF}{Bw \times AT} \times 10^{-3}$$

kanker akan memiliki nilai tersebut. Adapun rumus yang digunakan penentuan risiko untuk pajanan kanker adalah sebagai berikut :

Parameter risiko karsinogenik menunjukkan kemungkinan kanker pada populasi manusia; Pada jalur inhalasi, D_{inh} adalah dosis asupan harian rata-rata per unit waktu dan berat badan manusia yang terpapar karsinogen, yaitu dosis harian melalui jalur pernapasan; SF adalah *Cancer Slope* karsinogenik (mg/(kg·d)) - 1; dan (Risiko)_T adalah risiko total karsinogenik, yang merupakan jumlah dari beberapa nilai risiko karsinogenik. Jika nilai risiko karsinogenik adalah antara 1×10^{-6} dan 1×10^{-4} berarti ada risiko karsinogenik (Cai, L., Li, H., & Na, 2019; Huang, Z., Pan, X., Wu, P., & Han, 2018).

2.4.3 Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA)

Semua data yang telah di *cleaning* kemudian dilakukan analisis secara univariat untuk melihat distribusi frekuensi dan persentase dari setiap variable. Data dari hasil pemeriksaan laboratorium dan wawancara selanjutnya dianalisis menggunakan metode QMRA. QMRA melibatkan penerapan prinsip-prinsip penilaian risiko untuk memperkirakan kemungkinan infeksi risiko atau penyakit akibat paparan mikroorganisme menular. Ini terdiri dari empat langkah:

1. Hazard Identification

Tahap ini bertujuan untuk mengidentifikasi patogen yang relevan dan tensi menimbulkan risiko kesehatan pada populasi. Informasi enai jenis mikroorganisme (*E. coli*, *Salmonella*, *Cryptosporidium*, sumber pencemaran, serta dampaknya terhadap kesehatan



manusia dikumpulkan dari literatur, data lokal, atau hasil penelitian. Hasil dari tahap ini menjadi dasar untuk menentukan parameter yang akan dihitung. (FAO/WHO, 2003).

2. Penilaian Paparan (Exposure Assessment)

Pada tahap ini, jumlah patogen yang masuk ke tubuh melalui paparan dihitung. Penilaian dilakukan dengan mempertimbangkan:

Konsentrasi patogen: Jumlah patogen per satuan volume (contoh: CFU/L untuk air atau MPN/g untuk makanan).

Volume paparan: Jumlah media yang terpapar, seperti air yang diminum (liter/hari) atau makanan yang dikonsumsi (gram/hari).

Faktor mitigasi: Proses pengolahan atau pengurangan, seperti pemasakan atau klorinasi.

Frekuensi paparan: Jumlah paparan dalam sehari, seminggu, atau setahun.

Perhitungan dosis patogen yang tertelan:

$$D = C \times V \times F \times N$$

Keterangan :

D: Dosis patogen yang tertelan (jumlah mikroorganisme).

C: Konsentrasi patogen dalam media.

V: Volume

F: Fraksi patogen yang bertahan.

N: Frekuensi paparan. (Haas et al., 2014)

3. Penilaian Dosis-Respon (Dose-Response Assessment)

Pada tahap ini, hubungan antara dosis patogen yang masuk ke tubuh dan kemungkinan terjadinya infeksi atau penyakit dihitung menggunakan model dosis-respon. Model ini diturunkan dari data eksperimen atau epidemiologi untuk patogen tertentu.

Persamaan umum dosis-respon:

$$P_{\text{infeksi}} = 1 - (1 + D/k)^{-r}$$

dimana:

P_{infeksi} : Probabilitas infeksi.

D : Dosis patogen yang tertelan.

r : Parameter spesifik untuk patogen, diperoleh dari literatur. (Teunis & Havelaar, 2000)



4. Risk Characterization

Tahap ini menggabungkan hasil penilaian pajanan dan hubungan dosis-respon untuk memperkirakan risiko infeksi. Risiko harian dan tahunan dihitung untuk menggambarkan kemungkinan infeksi dalam rentang waktu tertentu.

Risiko Harian (Daily Risk):

$$P_{\text{daily}} = 1 - (1 - P_{\text{infeksi}})$$

Risiko Tahunan (Annual Risk):

$$P_{\text{annual}} = 1 - (1 - P_{\text{daily}})^n$$

di mana:

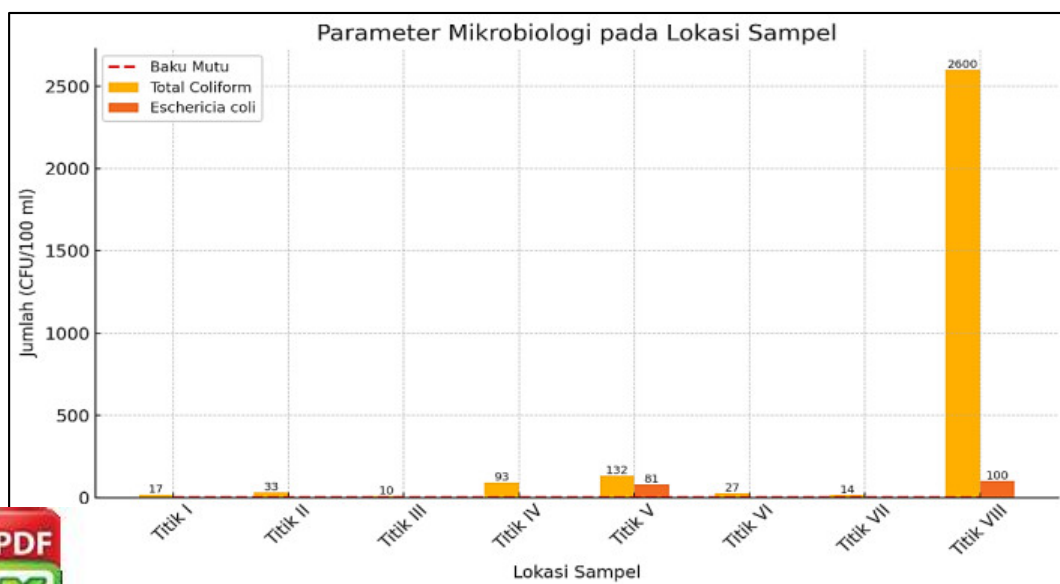
P_{annual} : Probabilitas infeksi dalam satu tahun.

n : Jumlah hari dalam setahun (biasanya 365 hari). (Haas et al., 2014)

2.5 Hasil

2.5.1 Kosentrasi Pajanan Mikroorganisme Pada PAH

Hasil uji laboratorium Balai Besar Laboratorium Kesehatan Makassar (BBLK) terhadap parameter kualitas air (air hujan) yang di ukur pada saat penelitian yaitu Parameter mikrobiologi secara rinci dapat dilihat pada Gambar 5 berikut:



. Grafik Perbandingan antar titik Sampling Kualitas Air Hujan Parameter Kimia

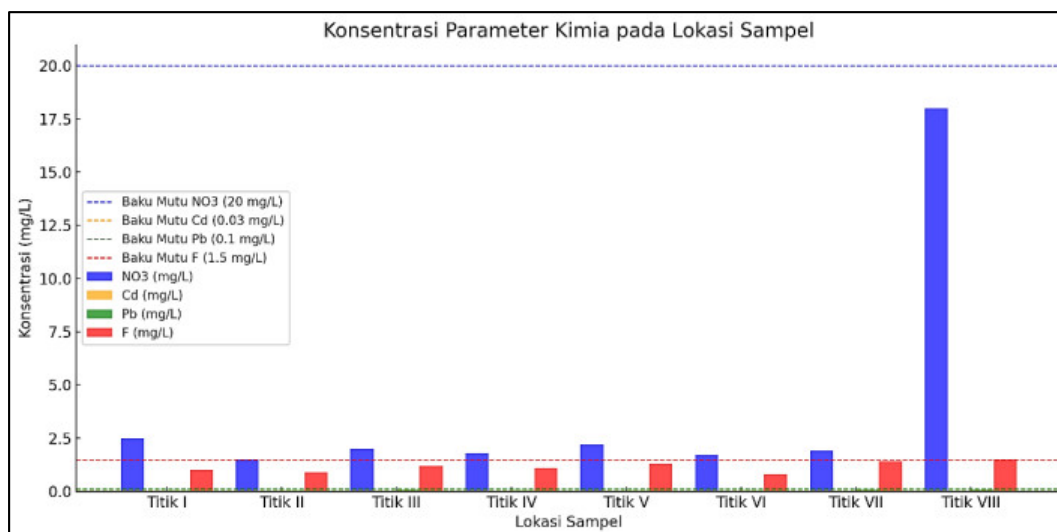


Gambar 5 menunjukkan hasil pengukuran parameter mikrobiologi berupa Total Coliform dan Escherichia coli (E. coli) pada delapan titik lokasi sampel dibandingkan dengan baku mutu (0 CFU/100 ml). Sebagian besar lokasi memiliki hasil E. coli yang sesuai dengan baku mutu, kecuali Titik V (81 CFU/100 ml) dan Titik VIII (100 CFU/100 ml), yang menunjukkan adanya kontaminasi. Total Coliform di beberapa lokasi, seperti Titik IV (93 CFU/100 ml), Titik V (132 CFU/100 ml), dan terutama Titik VIII (2.600 CFU/100 ml), juga jauh melampaui baku mutu, mengindikasikan pencemaran mikrobiologi yang signifikan. Tingginya nilai pada Titik VIII kemungkinan disebabkan oleh keberadaan sumber pencemaran seperti limbah domestik, aktivitas manusia, atau aliran limpasan permukaan (runoff) yang membawa kontaminan ke lokasi ini. Titik VIII menjadi lokasi dengan tingkat pencemaran tertinggi, memerlukan perhatian serius terhadap potensi risiko kesehatan. Oleh karena itu, diperlukan pengawasan lebih lanjut, pengolahan air yang memadai, serta investigasi sumber pencemaran di titik-titik tersebut untuk mitigasi risiko.

2.5.2 Kosentrasi Paparan Kimia (pH, Nitrat (NO_3), Kadmium (Cd), Timbal (Pb), Fluoride (F) Pada PAH.

Hasil uji laboratorium Balai Besar Laboratorium Kesehatan Makassar (BBLK) terhadap parameter kualitas air (air hujan) yang di ukur pada saat penelitian yaitu Parameter Kimia pH, Nitrat (NO_3), Kadmium (Cd), Timbal (Pb), Fluoride (F) secara rinci dapat dilihat pada Tabel 5 sebagai berikut:





Gambar 6. Grafik Perbandingan antar titik Sampling Kualitas Air Hujan Parameter Kimia

Gambar 6 menunjukkan bahwa sebagian besar parameter kimia, yaitu NO₃ (nitrat), Cd (kadmium), Pb (timbal), dan F (fluorida), berada di bawah baku mutu yang telah ditetapkan. Konsentrasi NO₃ relatif rendah di semua lokasi kecuali Titik VIII, yang menunjukkan nilai tinggi sebesar 11,8 mg/L, meskipun masih di bawah baku mutu 20 mg/L. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh limpasan limbah domestik atau aktivitas pertanian di sekitar lokasi. Konsentrasi Cd dan Pb di semua titik sangat rendah, menunjukkan tidak adanya sumber pencemaran signifikan seperti aktivitas industri atau pertambangan. Fluorida menunjukkan variasi konsentrasi antara 0,15 mg/L hingga 0,8 mg/L, dengan Titik VIII mencatatkan nilai tertinggi yang masih di bawah baku mutu 1,5 mg/L, kemungkinan terkait dengan faktor geologis setempat. Secara keseluruhan, hasil ini mencerminkan kondisi lingkungan yang relatif baik, meskipun pengawasan lebih lanjut diperlukan pada Titik VIII untuk mengidentifikasi potensi sumber pencemaran nitrat dan menjaga keberlanjutan kualitas air di lokasi lainnya.



2.5.3 Analisis *Quantitative Microbial Risk Assessment Total Coliform* dan *E.coli* Pada Penampungan Air Hujan

Hasil uji laboratorium Balai Besar Laboratorium Kesehatan Makassar (BBLK) terhadap parameter kualitas air (mata air) yang di ukur pada saat penelitian yaitu mikrobiologi secara rinci dapat dilihat pada Tabel 5 Berikut ini:

Tabel 5 Distribusi Frekuensi Berdasarkan Kandungan Mikrobiologi

Lokasi	Sampel	Microbiological Parameters	
		<i>Total coliform</i>	<i>Eschericia coli</i>
Titik I		17	0
Titik II		33	0
Titik III		10	0
Titik IV		93	0
Titik V		132	81
Titik VI		27	0
Titik VII		14	0
Titik VIII		2.600	100
Min.		10	0
Max.		2.600	100

Sumber : Data Primer, 2024

Berdasarkan hasil pemeriksaan pada tabel 6 terhadap 8 titik lokasi penampung air hujan di Kecamatan Bulagi Utara Kabupaten Banggai Kepulauan didapatkan nilai rata rata Bakteri *Total Coliform* sebesar 365,75 CFU/100 ml dengan nilai minimal 10 CFU/100 ml dan nilai maksimal 2.600 CFU/100 ml. selanjutnya nilai rata rata bakteri *Eschrichia coli* sebesar 22,63 CFU/100 ml dengan nilai minimal 0 CFU/100 ml dan nilai maksimal 100 CFU/100 ml.

1. Identifikasi Bahaya (*Hazard Identification*)

Identifikasi bahaya dilakukan melalui pemeriksaan jenis bakteri patogen pada sampel air (mata air) di laboratorium BBLK Makassar. Dalam analisis risiko kuantitatif, untuk mengetahui paparan patogen air minum (E) maka dijabarkan dalam persamaan berikut:

$$E = CR \times (1 - PT)$$

eterangan :

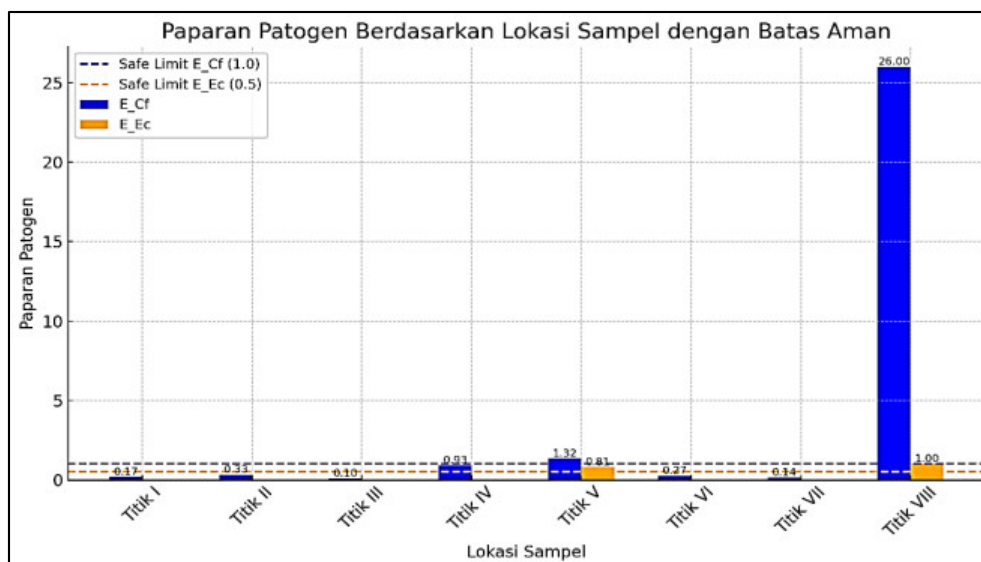
- : Paparan patogen air minum
- R : Kualitas air minum (organisme per liter)
- T : Efektifitas pengolahan (0,99)



Tabel 6. Distribusi rata rata paparan bakteri patogen pada air minum bersumber air hujan

Lokasi sampel Air Hujan	Jumlah Responden	E Cf	E Ec
Titik I	4	0.17	0
Titik II	22	0.33	0
Titik III	17	0.1	0
Titik IV	7	0.93	0
Titik V	16	1.32	0.81
Titik VI	2	0.27	0
Titik VII	20	0.14	0
Titik VIII	7	26	1

Sumber : Data Primer, 2024



Gambar 7. Grafik Paparan Bakteri Patogen

Berdasarkan Gambar 7 Grafik menunjukkan bahwa sebagian besar lokasi sampel (Titik I, II, III, IV, VI, dan VII) memiliki nilai E.Cf dan E.Ec di bawah batas aman ($E.Cf \leq 1.0$ dan $E.Ec \leq 0.5$), sehingga tidak menimbulkan risiko kesehatan yang signifikan. Namun, Titik V mencatatkan nilai E.Cf sebesar 1.32 dan E.Ec sebesar 0.81, keduanya melebihi batas aman, yang menunjukkan potensi risiko infeksi saluran a akibat kontaminasi mikrobiologi. Titik VIII memiliki tingkat aminasi tertinggi dengan nilai E.Cf sebesar 26.0 dan E.Ec sebesar jauh di atas batas aman, sehingga berisiko tinggi terhadap



kesehatan, seperti diare, infeksi gastrointestinal, atau penyakit akibat *Escherichia coli* patogenik. Untuk mengurangi risiko ini, perlu dilakukan investigasi sumber kontaminasi di Titik V dan VIII, pengolahan air seperti desinfeksi atau filtrasi, serta pemantauan rutin terhadap kualitas air hujan di seluruh lokasi sampel.

2. Analisis Paparan (*Exposure Assessment*)

Pada tahap ini, jumlah patogen yang masuk ke tubuh melalui paparan dihitung. Perhitungan dosis patogen yang tertelan:

$$D=C \times V \times F \times N$$

Keterangan :

D: Dosis patogen yang tertelan (jumlah mikroorganisme).

C: Konsentrasi patogen dalam media.

V: Volume

F: Fraksi patogen yang bertahan.

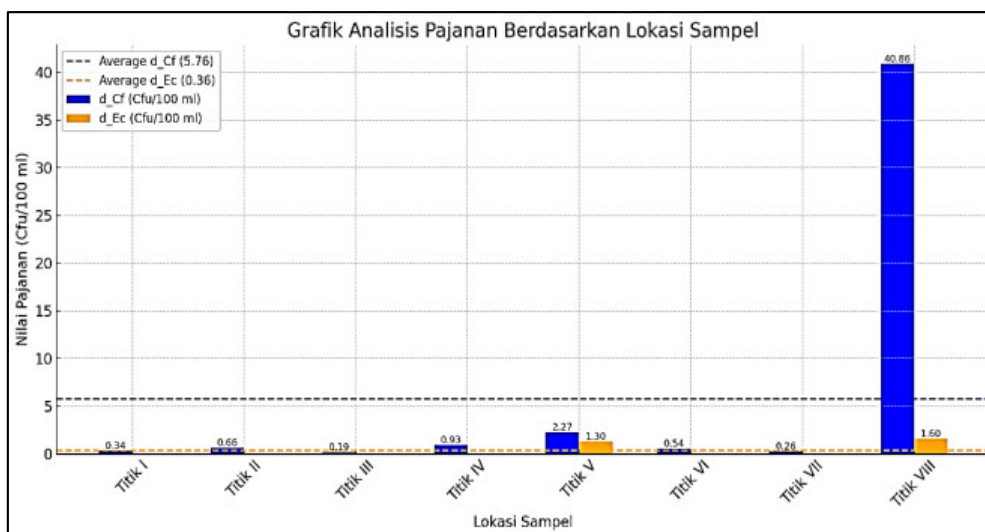
N: Frekuensi paparan. (*Haas et al., 2014*)

Tabel 7 Distribusi analisis Paparan

Lokasi Sampel Air Hujan	Jumlah Responden	d Cf	d Ec
Titik I	4	0.34	0
Titik II	22	0.66	0
Titik III	17	0.19	0
Titik IV	7	0.93	0
Titik V	16	2.27	1.30
Titik VI	2	0.54	0
Titik VII	20	0.26	0
Titik VIII	7	40.86	1.6

Sumber : Data Primer, 2024





Gambar 8. Grafik analisis Pajanan

Tabel 7 dan grafik 8 analisis pajanan menunjukkan tingkat kontaminasi mikrobiologi berdasarkan nilai d.Cf (coliform) dan d.Ec (*Escherichia coli*) di delapan lokasi sampel air hujan, dengan satuan CFU/100 ml. Sebagian besar lokasi (Titik I-IV, VI, VII) memiliki nilai d.Cf dan d.Ec yang rendah, di bawah rata-rata masing-masing 5.76 CFU/100 ml dan 0.36 CFU/100 ml, menunjukkan tingkat kontaminasi minimal dan risiko kesehatan yang rendah. Namun, Titik VIII mencatat nilai d.Cf sebesar 40.86 CFU/100 ml dan d.Ec sebesar 1.60 CFU/100 ml, jauh di atas rata-rata, menjadikannya lokasi dengan tingkat kontaminasi tertinggi. Titik V juga menunjukkan kontaminasi yang signifikan, dengan nilai d.Cf sebesar 2.27 CFU/100 ml dan d.Ec sebesar 1.30 CFU/100 ml, keduanya di atas rata-rata. Tingginya nilai d.Cf dan d.Ec di kedua lokasi ini meningkatkan risiko kesehatan, terutama risiko infeksi saluran cerna seperti diare dan penyakit lain akibat paparan mikrobiologi, khususnya pada kelompok rentan seperti anak-anak dan lansia. Oleh karena itu, diperlukan investigasi terhadap sumber kontaminasi di Titik V dan VIII, pengolahan air seperti desinfeksi atau filtrasi sebelum digunakan, serta pantauan kualitas air secara rutin untuk mencegah peningkatan aminasi.



3. Penilaian Dosis-Respon (Dose-Response Assessment)

Pada tahap ini, hubungan antara dosis patogen yang masuk ke tubuh dan kemungkinan terjadinya infeksi atau penyakit dihitung menggunakan model dosis-respon. Model ini diturunkan dari data eksperimen atau epidemiologi untuk patogen tertentu.

Persamaan umum dosis-respon:

$$P_{\text{infeksi}} = 1 - (1 + D/k)^{-r}$$

di mana:

P_{infeksi} : Probabilitas infeksi.

D : Dosis patogen yang tertelan.

k dan r : Parameter spesifik untuk patogen, diperoleh dari literatur.
(Teunis & Havelaar, 2000)

Hasil Perhitungan analisis Doses Respon dapat dilihat pada tabel berikut ;

Tabel 8. Distribusi Analisis Doses Respon

Lokasi Sampel Air Hujan	Jumlah Responden	$P_{\text{inf Cf}}$	$P_{\text{inf Ec}}$	Keterangan
Titik I	4	3.40E-08	0.00E+00	Probabilitas infeksi coliform sangat rendah, tanpa risiko infeksi <i>E. coli</i> .
Titik II	22	6.14E-08	0.00E+00	Risiko infeksi coliform sangat rendah, tidak terdeteksi risiko <i>E. coli</i> .
Titik III	17	1.94E-08	0.00E+00	Risiko infeksi coliform dan <i>E. coli</i> tidak signifikan, menunjukkan kondisi yang aman.
Titik IV	7	1.73E-07	0.00E+00	Probabilitas infeksi coliform sedikit lebih tinggi dibanding lokasi lain, namun masih rendah, tanpa risiko <i>E. coli</i> .
Titik V	16	2.27E-07	1.30E-07	Probabilitas infeksi coliform dan <i>E. coli</i> lebih tinggi dibanding lokasi lain, perlu perhatian lebih lanjut.
Titik VI	2	5.39E-08	0.00E+00	Risiko infeksi coliform sangat rendah, tidak ada risiko <i>E. coli</i> .
Titik VII	20	2.56E-08	0.00E+00	Probabilitas infeksi coliform sangat rendah, tanpa risiko infeksi <i>E. coli</i> .
VIII	7	4.08E-06	1.57E-07	Lokasi dengan probabilitas infeksi tertinggi untuk coliform dan <i>E. coli</i> , menunjukkan tingkat risiko signifikan yang memerlukan tindakan mitigasi.

er : Data Primer, 2024



Tabel 8 analisis dosis-respon menunjukkan bahwa sebagian besar lokasi sampel, seperti Titik I, II, III, VI, dan VII, memiliki probabilitas infeksi (Pinf Cf untuk coliform dan Pinf Ec untuk *E. coli*) yang sangat rendah, dengan Pinf Cf di kisaran 10^{-8} hingga 10^{-7} dan Pinf Ec sebesar 0, sehingga risiko infeksi mikrobiologi pada lokasi-lokasi ini dapat dianggap tidak signifikan. Namun, Titik V dan Titik VIII menunjukkan risiko yang lebih tinggi, dengan Titik V mencatatkan Pinf Cf sebesar $2.27E-07$ dan Pinf Ec sebesar $1.30E-07$, sedangkan Titik VIII memiliki probabilitas infeksi tertinggi dengan Pinf Cf sebesar $4.08E-06$ dan Pinf Ec sebesar $1.57E-07$, yang menunjukkan tingkat kontaminasi mikrobiologi signifikan, terutama pada coliform di Titik VIII. Risiko ini dapat menyebabkan infeksi saluran cerna seperti diare atau penyakit lain akibat kontaminasi mikrobiologi, khususnya bagi kelompok rentan seperti anak-anak dan lansia. Untuk mitigasi, perlu dilakukan investigasi terhadap sumber kontaminasi di Titik V dan Titik VIII, pengolahan air seperti desinfeksi atau filtrasi sebelum digunakan, serta pemantauan rutin kualitas air di seluruh lokasi sampel untuk mencegah peningkatan risiko infeksi.

4. Risk Characterization

Tahap ini menggabungkan hasil penilaian pajanan dan hubungan dosis-respon untuk memperkirakan risiko infeksi. Risiko tahunan dihitung untuk menggambarkan kemungkinan infeksi dalam rentang waktu tertentu.

Risiko Tahunan (Annual Risk):

$$P_{\text{annual}} = 1 - (1 - P_{\text{daily}})^n$$

di mana:

P_{annual} : Probabilitas infeksi dalam satu tahun.

n : Jumlah hari dalam setahun (biasanya 365 hari).
(Haas et al., 2014)



Hasil Perhitungan *Risk Characterization* dapat dilihat pada tabel berikut

Tabel 9. Distribusi Analisis *Risk Characterization*

Lokasi Sampel Air Hujan	Jumlah Responden	Pinf/yr Cf	Pinf/yr Ec
Titik I	4	1.24E-05	0.00E+00
Titik II	22	2.24E-05	0.00E+00
Titik III	17	7.08E-06	0.00E+00
Titik IV	7	6.30E-05	0.00E+00
Titik V	16	8.27E-05	4.73E-05
Titik VI	2	1.97E-05	0.00E+00
Titik VII	20	9.34E-06	0.00E+00
Titik VIII	7	1.49E-03	4.69E-05

Sumber : Data Primer, 2024

Berdasarkan tabel 9 Data probabilitas infeksi tahunan (Pinf/yr Cf untuk coliform dan Pinf/yr Ec untuk *E. coli*) menunjukkan bahwa sebagian besar lokasi memiliki risiko infeksi tahunan yang rendah, dengan Pinf/yr Cf berada di kisaran 1.0E-05 hingga 1.0E-06, seperti pada Titik I, II, III, VI, dan VII, yang mencerminkan kondisi air yang relatif aman. Titik IV memiliki Pinf/yr Cf sebesar 6.30E-05, sedikit lebih tinggi namun masih dalam kategori risiko rendah. Sementara itu, Titik V mencatatkan Pinf/yr Cf sebesar 8.27E-05 dan Pinf/yr Ec sebesar 4.73E-05, menunjukkan peningkatan risiko yang perlu diperhatikan. Titik VIII adalah lokasi dengan risiko tertinggi, dengan Pinf/yr Cf mencapai 1.49E-03 dan Pinf/yr Ec sebesar 4.69E-05, mengindikasikan potensi bahaya kesehatan yang signifikan, terutama dari coliform. Tingginya risiko di Titik VIII dapat disebabkan oleh kontaminasi yang lebih intensif, seperti limpasan limbah domestik, aktivitas manusia yang tidak terkendali, atau kondisi lingkungan sekitar yang mendukung proliferasi mikroorganisme. Berdasarkan standar internasional, seperti yang ditetapkan oleh WHO, risiko infeksi tahunan yang dapat diterima adalah $\leq 10^{-4}$, sehingga Titik VIII sudah melampaui batas toleransi dan memerlukan

mitigasi segera. Dampak kesehatan potensial mencakup diare, tifoid, dan infeksi saluran cerna lainnya, terutama bagi kelompok seperti anak-anak dan lansia. Oleh karena itu, diperlukan



pengolahan air melalui desinfeksi atau filtrasi, investigasi sumber kontaminasi di Titik V dan Titik VIII, serta pemantauan kualitas air secara berkala di seluruh lokasi sampel.

2.5.4 Analisis Risiko Kesehatan Pajanan Kimia (Nitrat (NO_3), Cadmiun (Cd), Timbal (Pb), Flouride (F)).

Pelaksanaan ARKL meliputi empat langkah yaitu: identifikasi bahaya, analisis dosis-respon, analisis pajanan, dan karakterisasi risiko namun untuk pemahaman yang lebih komprehensif, pedoman teknis ini juga menguraikan atau menjelaskan langkah–langkah pengelolaan dan komunikasi risiko sebagai tindak lanjut dari ARKL sehingga nantinya diharapkan dapat memberikan petunjuk teknis yang lengkap dalam melakukan analisis dan tindak lanjut dari ARKL

1. Identifikasi Bahaya Pajanan Kimia

Berdasarkan Hasil uji laboratorium Balai Besar Laboratorium Kesehatan Makassar (BBLK) terhadap 8 titik sampel air Hujan yang diambil pada penampungan air hujan dengan parameter yang di ukur pada saat penelitian yaitu Nitrat (NO_3), Cadmiun (Cd), Timbal (Pb), Flouride (F) secara rinci dapat dilihat pada Tabel 10 sebagai berikut :

Tabel 10. Distribusi Frekuensi Berdasarkan Kandungan Kimia

Lokasi Sampling	Kosentrasi (mg/L)				Baku Mutu
	NO_3	Cd	Pb	F	
Titik I	1.7	0.0001	0.0056	0.71	pH = 6.5 – 8.5 NO_3 = 20 mg/L Cd = 0.03 mg/L Pb = 0.1 mg/L F = 1.5 mg/L
Titik II	2.1	0.00003	0.0002	0.15	
Titik III	0.05	0.00003	0.0008	0.55	
Titik IV	1.3	0.00003	0.0001	0.28	
Titik V	1.2	0.00003	0.0002	0.25	
Titik VI	0.819	0.00003	0.0011	0.25	
Titik VII	0.05	0.0004	0.001	0.25	
Titik VIII	11.8	0.00003	0.0001	0.80	
Rerata	2.4	0.00009	0.0011	0.41	
Min	0.05	0.00003	0.0001	0.15	
Max	11.80	0.0004	0.001	0.80	

Sumber : Data Primer, 2024

Berdasarkan nilai rata-rata untuk nitrat, kadmium, timbal, dan fluorida, air lokasi-lokasi sampling berada dalam batas aman sesuai dengan baku mutu yang ditetapkan. Tidak ada parameter yang melebihi ambang



batas yang ditentukan, sehingga dapat disimpulkan bahwa air relatif aman untuk digunakan atau dikonsumsi, setidaknya dari segi komponen kimia yang diukur.

2. Analisis Doses Respon

Setelah melakukan identifikasi bahaya selanjutnya melakukan analisis dosis respon yaitu mencari nilai RfD, dan/atau SF dari agen risiko yang menjadi kajian ARKL, serta memahami efek apa saja yang mungkin ditimbulkan oleh agen risiko tersebut pada tubuh manusia. Pada kajian ARKL air minum bersumber air hujan di Kecamatan Bulagi Utara Kabupaten Banggai Kepulauan diketahui bahwa agen kimia pH, Nitrat (NO_3), Cadmiun (Cd), Timbal (Pb), Flouride (F) dapat masuk ke dalam tubuh manusia melalui jalur ingesti dan bersifat non karsinogenik

Tabel 11 Dosis Respon Agen Kimia Berisiko

Agen Risiko Kimia	Doses Respon (RfD)	Efek Kritis	Referensi
Nitrat (NO_3)	1,6E+0 mg/kg/ hari	Gejala klinis dini dari methemoglobinemia	(Bosch et al, 1977)
Cadmiun (Cd)	5E-4 mg/kg/day	Proteinuria akibat pajanan kronik pada manusia	(USEPA, 1985)
Timbal (Pb)	4E-3 mg/kg/hari	Kerusakan permanen pada otak dan sistem saraf	(IRIS, 2016)
Flouride (F)	6E-2 mg/kg/hari	Flourisis gigi dan efek kosmetik dalam studi epidemiolog	(Underwood, 1977)

Nilai RfD (Reference Dose) menunjukkan dosis harian yang dianggap aman bagi manusia seumur hidup tanpa efek berbahaya yang signifikan. Pajanan berlebihan dari agen-agen kimia ini berpotensi menimbulkan berbagai masalah kesehatan serius.



Analisis Pajanan

Analisis risiko kesehatan lingkungan dimulai dengan perhitungan laju paparan (intake) kemudian perhitungan tingkat risiko dengan karakteristik

risiko. Rumus perhitungan yang digunakan untuk intake pada jalur pemajanan ingesti nonkarsinogenik adalah sebagai berikut:

$$I_{nk} = \frac{C \times R \times fE \times Dt}{Wb \times t_{avg}}$$

Keterangan :

- I : Intake (Asupan) (mg/m³/hari)
 C : Konsentrasi risk agent mg/m³ untuk medium udara, mg/L untuk air minum, mg/kg untuk makanan atau pangan
 R : laju (rate) asupan atau konsumsi, m³/jam untuk inhalasi, L/Hari untuk air minum, gr/hari untuk makanan.
 fE : Frekuensi pajanan
 Dt : Durasi pajanan (Tahun)
 Wb : Berat Badan
 t_{avg} : Periode waktu rata-rata (30x365 hari/tahun untuk zat non karsinogen, 70 tahun x 365 hari/tahun untuk zat karsinogen)

Perkiraan risiko kesehatan untuk keseluruhan responden dihitung dengan menggunakan analisis deskriptif faktor pemajanan air minum bersumber air hujan non karsinogenik untuk menentukan *single point estimate* untuk perhitungan risiko kesehatan tersebut.

Tabel. 12 Analisis Faktor Pemajanan Air Minum Bersumber Air Hujan

Kelompok Reseptor	Nilai Faktor Pemajanan			
	Laju Konsumsi (Liter/Hari)	Frekuensi Pajanan (Hari/Tahun)	Rata Rata Berat Badan (Kg)	Durasi Pajanan (Tahun)
Anak Anak	1	350	15	30
Dewasa	2	350	55	30

Sumber : Data Primer, 2024

Berdasarkan nilai antropometri diketahui pada reseptor anak jumlah laju konsumsi air minum sebesar 1 liter/hari, frekuensi pajanan 350 hari/Tahun, rata-rata berat badan sebesar 15 kg, dan durasi pajanan 30 tahun. Selanjutnya nilai antropometri diketahui pada reseptor dewasa jumlah laju konsumsi air minum sebesar 2 liter/hari, frekuensi pajanan rata-rata berat badan sebesar 55 kg, durasi pajanan 30 tahun.



Tabel 13. Hasil Perhitungan Asupan (Intake) Non Karsinogenk Berdasarkan Kandungan kimia (NO^3 , Cd, F, Pb) Pada Penampungan Air Hujan di Kecamatan Bulagi Utara Selama 30 Tahun akan Datang

Kadar	Laju Asupan (mg/L)			
	I_{nk} Nitrat (NO^3)	I_{nk} Cadmiun (Cd)	I_{nk} Flouride (F)	I_{nk} Timbal (Pb)
Min.	5.705E-02	2.158E-06	9.829E-03	2.637E-05
Max.	2.260E-01	8.545E-06	3.893E-02	1.044E-04

Sumber : Data Primer, 2024

Tabel 13 menampilkan hasil perhitungan rata-rata asupan (intake) berdasarkan nilai minimal dan maksimal zat kimia yang diterima. Nitrat mencapai nilai tertinggi 2.260E-01 mg/L, Cadmium mencapai nilai tertinggi 9E-06 mg/L, Fluoride mencapai nilai tertinggi 3.893E-02 mg/L, Timbal mencapai nilai tertinggi 1.044E-04 mg/L.

4. Karakteristik Risiko

Hasil perhitungan laju asupan (intake) selanjutnya digunakan dalam perhitungan karakteristik risiko. Karakterisasi risiko (risk characterization) merupakan langkah akhir dalam melakukan ARKL guna menentukan apakah agen risiko pada konsentrasi tertentu yang dianalisis pada ARKL berisiko menimbulkan gangguan kesehatan pada masyarakat atau tidak. Karakterisasi dinyatakan dalam Risk Quotient (RQ) untuk efek-efek non-karsinogenik. Penghitungan RQ dilakukan dengan cara melakukan pembagian antara asupan dengan reference dose (RfD) menggunakan rumus persamaan:

$$RQ = I_{nk}/RfD$$

Keterangan :

RQ = Tingkat risiko pajanan non-karsinogenik

I = Asupan (intake) (mg/kg/hari)

RfD = Konsentrasi referensi (mg/kg/hari)

RQ dihitung dengan membandingkan antara intake atau jumlah konsentrasi agen kimia yang masuk ke dalam tubuh manusia dengan badan tertentu setiap harinya dengan nilai RfD (Reference Dose)



yang telah diperoleh berdasarkan literatur pada database Integrated Risk Information System (IRIS). Tingkat risiko dinyatakan dalam angka atau bilangan desimal tanpa satuan. Tingkat risiko dikatakan AMAN bilamana intake $\leq$ RfD atau RfCnya atau dinyatakan dengan $RQ \leq 1$. Tingkat risiko dikatakan TIDAK AMAN bilamana intake $>$ RfD atau RfCnya atau dinyatakan dengan $RQ > 1$.

Tabel 14. Hasil Perhitungan Besar Risiko (RQ) Berdasarkan Kandungan kimia (NO_3 , Cd, F, Pb) Pada Penampungan Air Hujan di Kecamatan Bulagi Utara Selama 30 Tahun akan Datang

Titik	Anak Anak				Dewasa			
	RQ Nitrat	RQ Cadmium	RQ Flourida	RQ Timbal	RQ Nitrat	RQ Cadmium	RQ Flourida	RQ Timbal
1	5.82E-02	1.10E-02	6.76E-01	7.67E-02	3.40E-02	6.39E-03	3.94E-01	4.47E-02
2	1.05E-01	4.79E-03	4.79E-03	3.20E-02	6.29E-02	2.88E-03	2.88E-03	1.92E-02
3	2.21E-03	1.33E-06	2.43E-02	3.54E-04	1.63E-03	9.77E-07	1.79E-02	2.61E-04
4	5.57E-02	4.11E-02	3.20E-01	1.71E-03	3.46E-02	2.56E-02	1.99E-01	1.07E-03
5	6.61E-02	5.29E-03	3.67E-01	4.22E-03	3.35E-02	2.68E-03	1.86E-01	2.14E-03
6	2.73E-02	3.71E-03	2.58E-01	1.70E-02	6.54E-03	7.67E-04	5.33E-02	3.52E-03
7	2.97E-03	7.60E-02	3.96E-01	2.37E-02	1.05E-03	2.69E-02	1.40E-01	8.41E-03
8	3.77E-05	1.21E-01	1.00E-03	1.51E-02	1.18E-05	3.77E-02	3.14E-04	4.71E-03

Sumber : Data Primer, 2024

Tabel 14 di atas menunjukkan *Risk Quotient* (RQ) untuk beberapa kontaminan, termasuk Nitrat (NO_3), Kadmium (Cd), Fluorida (F), dan Timbal (Pb), pada dua kelompok reseptor, yaitu anak-anak dan dewasa. *Risk Quotient* (RQ) adalah rasio antara paparan kontaminan dengan tingkat referensi yang tidak menimbulkan risiko kesehatan. Nilai RQ lebih besar dari 1 menunjukkan adanya potensi risiko kesehatan.

Nitrat dan Cadmium memiliki nilai RQ yang rendah di semua titik untuk anak-anak dan dewasa, menunjukkan risiko yang relatif rendah terhadap kesehatan. Fluoride pada anak-anak mendekati batas risiko di beberapa titik, khususnya di titik 1, sehingga pemantauan lebih lanjut diperlukan untuk menghindari risiko kesehatan yang signifikan, terutama fluorosis

anak-anak. Timbal menunjukkan nilai RQ yang rendah, namun harus diperhatikan karena Timbal adalah zat toksik yang bahkan konsentrasi rendah dapat menimbulkan dampak jangka panjang,



terutama pada anak-anak yang lebih rentan terhadap dampak keracunan Timbal.

2.5.5 Analisis Tingkat Risiko Kesehatan Non-Karsinogenik dan Karsinogenik pada Penduduk akibat Paparan Mikrobiologi dan Kimia berdasarkan Target Hazard Quotient dan Target Cancer Risk di Kecamatan Bulagi Utara

Untuk menghitung tingkat risiko kesehatan non-karsinogenik dan karsinogenik pada penduduk akibat eksposur paparan mikrobiologi dan kimia dengan menggunakan perhitungan Target Hazard Quotient (THQ) dan Target Cancer Risks, langkah-langkahnya adalah sebagai berikut:

- a. Konsentrasi polutan dalam udara di daerah tersebut diukur menggunakan alat pemantau kualitas udara, sehingga data mengenai tingkat pencemaran dapat diperoleh dengan akurat.
- b. Nilai batas ambang (reference dose atau RfD) untuk masing-masing polutan ditentukan berdasarkan sumber terpercaya seperti Environmental Protection Agency (EPA) atau World Health Organization (WHO), yang menyediakan panduan konsentrasi aman untuk setiap jenis polutan.
- c. Nilai THQ untuk setiap polutan dihitung menggunakan rumus:

$$THQ = (\text{kontak harian} \times \text{bobot harian}) / RfD$$

Kontak harian adalah jumlah polutan yang tertelan atau terpapar oleh individu setiap hari, sedangkan bobot harian adalah berapa lama durasi eksposur terhadap polutan tersebut setiap hari dalam tahun. Jika $THQ > 1$, maka terdapat risiko kesehatan non-karsinogenik yang signifikan.



Tabel 15. *Target Hazard Quotient* (THQ) Paparan Mikrobiologi

Titik	Anak Anak		Dewasa	
	Total Coliform	E.coli	Total Coliform	E.coli
1	3.6E+05	0.0E+00	4.3E+05	0.0E+00
2	6.6E+05	0.0E+00	9.6E+05	0.0E+00
3	2.2E+05	0.0E+00	1.7E+05	0.0E+00
4	2.0E+04	0.0E+00	1.9E+04	0.0E+00
5	2.5E+04	1.5E+04	4.2E+04	2.6E+04
6	7.5E+03	0.0E+00	3.6E+02	0.0E+00
7	3.2E+03	0.0E+00	3.0E+03	0.0E+00
8	5.0E+05	1.9E+04	2.8E+05	1.1E+04

Sumber : Data Primer, 2024

Berdasarkan Tabel 15 yang menyajikan nilai Target Hazard Quotient (THQ) untuk paparan mikrobiologi (Total Coliform dan E.coli) pada Anak-anak dan Dewasa. Titik 5 dan Titik 8 adalah dua titik yang paling mengkhawatirkan, dengan nilai THQ E.coli yang signifikan untuk kedua kelompok (Anak-anak dan Dewasa), menunjukkan risiko paparan mikrobiologis yang tinggi. Titik-titik lain seperti Titik 1, Titik 2, dan Titik 3 menunjukkan risiko yang lebih terkait dengan Total Coliform, namun tidak ada deteksi E.coli, sehingga risiko terkait kontaminasi tinja di titik-titik ini relatif rendah. Anak-anak cenderung memiliki risiko lebih besar di beberapa titik, terutama pada Titik 8, karena nilai THQ untuk mereka lebih tinggi dibandingkan dengan Dewasa.

Perlu ada perhatian khusus pada titik dengan nilai THQ yang lebih tinggi dari 1, terutama di titik yang menunjukkan nilai THQ E.coli, karena ini mengindikasikan adanya potensi risiko kesehatan yang perlu ditindaklanjuti, seperti perbaikan sanitasi dan pengelolaan air di lokasi tersebut.



Tabel 16. *Target Hazard Qutient* (THQ) Paparan Kimia

Titik	Anak Anak				Dewasa			
	Nitrat	Cadmium	Flourida	Timbal	Nitrat	Cadmium	Flourida	Timbal
1	2.2E-02	4.2E-03	2.6E-01	2.9E-02	3.4E-02	6.4E-03	3.9E-01	4.5E-02
2	3.8E-02	1.8E-03	1.8E-03	1.2E-02	6.0E-02	2.7E-03	2.7E-03	1.8E-02
3	8.1E-04	4.9E-07	8.9E-03	1.3E-04	1.1E-03	6.6E-07	1.2E-02	1.7E-04
4	2.2E-02	1.6E-02	1.3E-01	6.8E-04	2.3E-02	1.7E-02	1.3E-01	7.0E-04
5	2.6E-02	2.1E-03	1.5E-01	1.7E-03	5.0E-02	4.0E-03	2.8E-01	3.2E-03
6	1.4E-02	1.9E-03	1.3E-01	8.5E-03	6.5E-04	7.7E-05	5.3E-03	3.5E-04
7	1.1E-03	2.8E-02	1.5E-01	8.7E-03	1.4E-03	3.5E-02	1.8E-01	1.1E-02
8	1.6E-05	5.0E-02	4.2E-04	6.3E-03	7.8E-06	2.5E-02	2.1E-04	3.1E-03

Sumber : Data Primer, 2024

Tabel 16 menunjukkan Nilai THQ untuk dewasa secara umum lebih rendah dibandingkan dengan anak-anak, meskipun ada pengecualian pada beberapa titik untuk Fluoride. Hal ini menunjukkan bahwa risiko kesehatan pada orang dewasa akibat paparan Nitrat, Cadmium, Fluoride, dan Timbal lebih rendah secara keseluruhan. Fluoride pada dewasa di Titik 1 (0.39) mendekati nilai $THQ = 1$, yang berarti potensi risiko mulai muncul. Risiko kesehatan yang dapat muncul akibat paparan Fluoride dalam konsentrasi tinggi mencakup fluorosis gigi, yang menyebabkan perubahan warna dan struktur email gigi, serta fluorosis tulang pada paparan jangka panjang, yang dapat mengakibatkan nyeri sendi dan kerapuhan tulang.

Pada konsentrasi tinggi, Nitrat berisiko menyebabkan methemoglobinemia (penurunan kemampuan darah untuk mengangkut oksigen) pada individu yang rentan. Cadmium dapat menyebabkan gangguan ginjal dan efek toksik pada tulang, seperti osteomalasia, akibat paparan kronis. Sementara itu, Timbal, meskipun konsentrasinya rendah, memiliki potensi risiko jangka panjang, terutama pada sistem saraf pusat, menyebabkan penurunan kognitif, hipertensi, dan masalah kardiovaskular. Oleh karena itu, meskipun nilai THQ untuk dewasa masih di bawah 1, potensi dampak jangka panjang dari akumulasi zat-zat ini tetap perlu diperhatikan.



2.6 Pembahasan

Air sangat penting bagi kehidupan, dan manusia membutuhkan tidak kurang dari 1 liter air setiap hari. Kualitas air yang baik penting untuk menjaga kesehatan. Air layak minum memenuhi persyaratan tertentu, yaitu persyaratan fisik, kimia, bakteriologi dan radioaktivitas. Zat kimia yang larut dalam air berasal dari proses alami. Ada beberapa zat kimia yang diperlukan tubuh, tetapi dapat membahayakan kesehatan manusia jika melebihi konsentrasi tertentu.

Pengalaman dari berbagai laporan penelitian menyimpulkan bahwa air hujan yang dipanen harus diolah sebelum digunakan untuk keperluan minum. Selain itu, klorinasi dalam tangki penyimpanan, pembersihan permukaan bidang tangkapan dan saluran secara berkala, harus dilakukan untuk meminimalkan akumulasi kotoran. Kepatuhan terhadap praktik-praktik ini merupakan faktor kunci untuk menghindari penurunan kualitas air hujan selama tahap penyimpanan, terutama kontaminasi mikroorganisme.(Koplan et al., 1978)(Nalwanga et al., 2018)(Palla et al., 2017)(Waso et al., 2018)

Bidang tangkapan adalah bagian dari sistem RWH yang bertugas menangkap air hujan, dapat berupa atap atau lapisan kedap air lainnya. Air hujan dari bidang tangkapan selanjutnya dialirkan melalui pipa menuju tangki penyimpanan (reservoir). Mempertimbangkan pencucian atmosfer sebagai sumber kontaminasi, maka kualitas air hujan terbaik untuk daerah perkotaan adalah setelah pembersihan atap pertama (awal hujan), sehingga meminimalkan efek dari partikel yang terdapat di permukaan atap. Cara ini akan meningkatkan kualitas air hujan yang dipanen(Donohue et al., 2017)(Sánchez et al., 2015). Melaporkan bahwa konsentrasi partikel relatif tinggi pada awal turunnya hujan, dan hanya hanyut pada intensitas hujan yang tinggi. Sekitar 80% pengendapan partikel pada lapisan atap terjadi di hari pertama tanpa hujan.(Egodawatta et al., 2009) Mikroorganisme patogen yang ditularkan melalui air dapat hadir di atap ini karena aktivitas biologis yang terkait dengan pengendapan



kotoran yang tertiuap angin, tinja dari burung dan hewan lain, serangga, serasah, lumut, jamur atau tumbuhan yang jatuh dari pohon di sekitarnya (Abdulla & Al-Shareef, 2009) (Donohue et al., 2017) (Nalwanga et al., 2018) (Sánchez et al., 2015). Pengotoran atap yang paling parah terjadi ketika berada di bawah pohon tempat burung bertengger. Oleh karena itu, disarankan agar air yang mengalir dari atap pada hujan pertama dibuang untuk 5–10 menit pertama (Donohue et al., 2017). Beberapa peneliti lain juga telah melaporkan ditemukannya bakteri *Escherichia coli* pada air hujan (Abdulla & Al-Shareef, 2009) (Bae et al., 2019) (García-Montoya et al., 2015) (Hamilton et al., 2016) (Mendez et al., 2011) (Nalwanga et al., 2018) (Sánchez et al., 2015).

Studi kasus di Karibia melaporkan bahwa wabah salmonellosis berkaitan dengan cecukan kotoran burung pada bidang tangkapan air hujan yang digunakan untuk air minum (Koplan et al., 1978). Laporan yang sama juga disampaikan dari Australia (Franklin et al., 2009). Sumber *E. coli* dalam tangki air hujan di Australia kemungkinan besar dari tinja burung dan possum (sejenis tupai). Bakteri lain yang ditemukan adalah *Campylobacter* yang dapat menyebabkan gangguan pencernaan (Ahmed et al., 2011).

Selain risiko biologis, juga terdapat sumber kontaminan anorganik untuk air hujan. Polutan logam seperti seng, tembaga dan timah berkaitan dengan korosi pada bahan atap. Korosi terjadi akibat air hujan yang bersifat asam sehingga dapat melarutkan logam dari bahan bidang tangkapan, pipa, dan tangki penyimpanan. melaporkan bahwa kontributor utama terhadap konsentrasi timbal dalam tangki air hujan perkotaan berasal dari cat berbasis timbal, pipa, bahan bangunan (galvanisasi, bahan atap, baja) yang bertanggung jawab atas 79% timbal dalam sampel air tangki. (Huston et al., 2012)

Air minum merupakan jalur pajanan yang dikenal baik sebagai media logam berat. Banyak logam berat yang mendapat perhatian kontaminan lingkungan dan bahaya yang potensial misalnya kadmium (Cd), kromium (Cr) dan timbal (Pb). Faktor lingkungan adalah



penyebab utama suatu bencana kematian, kesakitan dan cacat secara menyeluruh. World Health Organization (WHO) memperkirakan bahwa dampak dari kurangnya air yang berkualitas dan pemenuhan air bersih yang baik dapat menyebabkan sekitar 25% kematian dan kesakitan di dunia. Keterpaparan oleh logam berat merupakan salah satu faktor yang berperan dalam memengaruhi kualitas air bersih. Untuk mengestimasi tingkat risiko yang dapat terjadi, dilakukanlah penelitian ARKL mengacu pada Pedoman Teknis ARKL Dirjen P2PL Kemenkes Tahun 2012.

2.6.1 Parameter Miroorganisme

Kecamatan Bulagi Utara merupakan salah satu wilayah yang menggunakan sistem penampungan air hujan (PAH) sebagai sumber air bersih. Sistem ini mengandalkan curah hujan yang dialirkan dari atap rumah menuju tangki penampungan. Namun, hasil penelitian menunjukkan bahwa penampungan air hujan di beberapa titik di kecamatan ini mengalami kontaminasi mikrobiologi, khususnya oleh bakteri *Total Coliform* dan *E. coli*, yang menimbulkan kekhawatiran tentang kualitas air yang dikonsumsi masyarakat.

Berdasarkan hasil uji laboratorium yang dilakukan oleh Balai Besar Laboratorium Kesehatan (BBLK) Makassar, hasil pemeriksaan kualitas air menunjukkan adanya kontaminasi oleh bakteri *Total Coliform* dan *E. coli* pada beberapa titik penampungan air hujan. *Total Coliform* terdeteksi pada seluruh titik sampel, dengan dua titik yang menunjukkan kontaminasi sangat tinggi, yaitu Titik V (132 CFU/100 ml) dan Titik VIII (2.600 CFU/100 ml). *E. coli* terdeteksi pada Titik V (81 CFU/100 ml) dan Titik VIII (100 CFU/100 ml), yang menunjukkan bahwa ada kontaminasi tinja pada air yang ditampung di lokasi tersebut.

Kontaminasi oleh bakteri *Total Coliform* dan *E. coli* dalam penampungan air hujan di Kecamatan Bulagi Utara dapat disebabkan oleh

a faktor:



1) Kebersihan Atap sebagai Bidang Tangkapan

Air hujan yang ditampung di PAH berasal dari atap rumah. Dalam beberapa kasus, atap yang digunakan sebagai bidang tangkapan tidak dibersihkan secara teratur. Akibatnya, kotoran, debu, dedaunan, dan bahkan kotoran hewan (seperti burung) dapat menumpuk di atap dan terbawa bersama air hujan ke dalam tangki penampungan. *Total Coliform* dan *E. coli* umumnya berasal dari kotoran hewan yang mungkin menumpuk di atap. Kotoran ini terbawa oleh air hujan, terutama selama hujan pertama, dan masuk ke dalam tangki air.

Jenis bahan atap mempengaruhi kualitas mikroba air hujan yang dipanen. Deteksi patogen potensial berbeda di antara bahan atap, menunjukkan bahwa bahan atap harus dipertimbangkan dalam desain sistem pemanenan air hujan jika airnya dimaksudkan untuk dikonsumsi. (Bae et al, 2019)

2) Tangki Penampungan yang Tidak Terjaga Kebersihannya

Tangki penampungan air hujan yang tidak tertutup rapat atau tidak dibersihkan secara berkala juga menjadi tempat berkembang biaknya mikroorganisme. Dalam beberapa kasus, tangki terbuka dapat dimasuki oleh serangga, tikus, atau burung, yang dapat mencemari air yang ditampung oleh *E. coli* dan bakteri lainnya. Titik VIII yang menunjukkan tingkat kontaminasi tertinggi dengan Total Coliform (2.600 CFU/100 ml) dan *E. coli* (100 CFU/100 ml) mengindikasikan adanya masalah serius pada kebersihan tangki penampungan.

3) Polusi Udara dan Pencucian Atmosfer

Udara di sekitar Kecamatan Bulagi Utara mungkin terkontaminasi oleh partikel debu dan polutan, yang kemudian larut dalam air hujan dan terbawa ke dalam sistem penampungan. Proses deposisi atmosfer (*wet deposition*) terjadi saat polutan udara larut dalam air hujan, yang dapat

mbah beban kontaminasi air yang ditampung.



4) Kurangnya Sistem Pengelolaan Air Awal (*First Flush*)

Sistem penampungan air hujan di beberapa lokasi mungkin belum dilengkapi dengan mekanisme untuk membuang air hujan pertama yang turun setelah lama tidak hujan. Air hujan pertama sering kali mengandung kontaminan paling banyak karena membersihkan kotoran yang menumpuk di atap. Jika air ini langsung masuk ke dalam tangki penampungan, kontaminasi mikrobiologi bisa meningkat.

Risiko Kesehatan yang Diakibatkan oleh Kontaminasi Kehadiran *Total Coliform* dan *E. coli* dalam air penampungan menandakan adanya risiko kesehatan bagi masyarakat yang menggunakan air ini untuk kebutuhan sehari-hari, seperti minum, memasak, dan mencuci. Beberapa risiko kesehatan yang mungkin muncul antara lain:

- a. Diare: Kontaminasi oleh *E. coli* sering dikaitkan dengan penyakit diare, yang bisa sangat berbahaya bagi anak-anak dan orang tua.
- b. Infeksi Saluran Pencernaan: Bakteri *E. coli* dan *Total Coliform* dapat menyebabkan infeksi serius pada saluran pencernaan, yang bisa berakibat pada muntah, kram perut, dan bahkan dehidrasi parah.
- c. Penyakit Lainnya: Air yang terkontaminasi oleh bakteri ini juga dapat menyebabkan penyakit lainnya seperti gastroenteritis, hepatitis A, dan kolera.

Untuk mengurangi kontaminasi bakteri di sistem penampungan air hujan di Kecamatan Bulagi Utara, beberapa langkah berikut ini perlu diambil:

1) Pembersihan Rutin dan Pemeliharaan Atap

Atap yang digunakan sebagai bidang tangkapan air hujan harus dibersihkan secara teratur untuk menghilangkan debu, kotoran, dan kotoran hewan. Ini sangat penting untuk mengurangi risiko kontaminasi air oleh bakteri patogen.



Salurkan Sistem Penampungan

Tangki penampungan air hujan harus ditutup dengan rapat untuk mencegah masuknya serangga, hewan, dan debu yang dapat

mencemari air. Tangki juga harus dibersihkan secara berkala untuk menghindari penumpukan kotoran dan mikroorganisme.

3) Pemasangan Sistem First Flush

Disarankan untuk memasang sistem *first flush* yang memungkinkan air hujan pertama yang turun dibuang sebelum air yang lebih bersih masuk ke tangki penampungan. Air hujan pertama biasanya mengandung polutan yang lebih tinggi.

4) Penerapan Sistem Filtrasi dan Disinfeksi

Untuk memastikan air yang dikonsumsi bebas dari bakteri berbahaya, sistem penampungan air hujan perlu dilengkapi dengan filter dan disinfektan. Klorinasi dapat digunakan untuk membunuh bakteri patogen yang ada dalam air, sementara filtrasi membantu menyaring partikel dan kontaminan.

5) Pendidikan dan Kesadaran Masyarakat

Masyarakat di Kecamatan Bulagi Utara perlu diberikan edukasi mengenai pentingnya menjaga kebersihan sistem penampungan air hujan dan bahaya yang terkait dengan penggunaan air yang tidak diolah. Kesadaran akan pentingnya sanitasi dan kebersihan dapat membantu mencegah kontaminasi lebih lanjut.

Penelitian yang dilakukan oleh Helmreich, B., & Horn, H. (2009) menunjukkan bahwa air hujan yang dipanen dapat tercemar oleh bakteri berbahaya, seperti coliform, jika tidak dilakukan perawatan sebelum digunakan. Penyaringan pasir lambat dan teknologi desinfeksi surya merupakan metode efektif untuk mengurangi pencemaran mikrobiologi.

Penelitian Sazakli et al. (2007) menunjukkan bahwa 80% sampel air hujan yang dipanen dari atap di Yunani terkontaminasi oleh *Escherichia coli* dan *Total Coliform*. Parameter mikrobiologi sangat dipengaruhi oleh kebersihan daerah tangkapan dan aktivitas manusia di sekitarnya.

Penelitian-penelitian ini menyoroti pentingnya pengelolaan sistem penampungan air hujan yang baik, termasuk pemeliharaan kebersihan atap



dan tangki serta penerapan teknologi penyaringan dan desinfeksi untuk mencegah pencemaran mikrobiologi yang berbahaya.

2.6.2 Parameter Kimia

Berdasarkan hasil pemeriksaan yang dilakukan terhadap penampungan air hujan (PAH) di Kecamatan Bulagi Utara, Kabupaten Banggai Kepulauan, ditemukan bahwa beberapa parameter kimia seperti pH, Nitrat (NO_3), Kadmium (Cd), Timbal (Pb), dan Fluoride (F) masih dalam batas yang diizinkan sesuai dengan Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023. Namun, fluktuasi pada beberapa parameter menunjukkan adanya variasi kualitas air yang perlu mendapatkan perhatian lebih lanjut.

- 1) Nilai pH pada air hujan yang ditampung di Kecamatan Bulagi Utara berkisar antara 6.72 hingga 8.5. Nilai ini masih berada dalam batas normal sesuai dengan standar yang ditetapkan, yaitu antara 6.5 hingga 8.5. Namun, pada beberapa titik seperti Titik III dan Titik IV, nilai pH berada di batas atas, yang mengindikasikan adanya potensi variasi keasaman pada air hujan yang ditampung.
 - 2) Konsentrasi nitrat di beberapa titik mendekati batas maksimum yang diperbolehkan (20 mg/L), terutama pada Titik II (21 mg/L) dan Titik I (17 mg/L). Konsentrasi nitrat yang tinggi dapat disebabkan oleh adanya polutan atau aktivitas manusia di sekitar area penampungan air. Meskipun berada di atas rata-rata, konsentrasi ini masih berada dalam ambang batas yang diizinkan
 - 3) Kadmium adalah logam berat yang berbahaya bagi kesehatan jika dikonsumsi dalam konsentrasi tinggi. Hasil pemeriksaan menunjukkan bahwa konsentrasi kadmium di semua titik sangat rendah, berkisar antara 0.00003 hingga 0.0001 mg/L, jauh di bawah batas maksimum yang diizinkan yaitu 0.003 mg/L
- Timbal juga merupakan logam berat berbahaya, namun hasil pengujian menunjukkan bahwa konsentrasi timbal di semua titik berada jauh di



bawah ambang batas yang diperbolehkan, yaitu 0.1 mg/L. Konsentrasi tertinggi ditemukan di Titik VI dengan nilai 0.0011 mg/L, yang masih jauh di bawah ambang batas.

- 5) Konsentrasi fluoride pada air hujan yang ditampung berkisar antara 0.15 hingga 0.80 mg/L. Nilai ini masih berada dalam batas yang aman sesuai dengan standar yang ditetapkan (1.5 mg/L). Konsentrasi tertinggi ditemukan pada Titik VIII, yaitu 0.80 mg/L, namun masih di bawah ambang batas yang diperbolehkan.

Berdasarkan hasil pemeriksaan, semua parameter kimia pada air hujan yang ditampung di Kecamatan Bulagi Utara masih berada dalam batas aman sesuai dengan standar yang ditetapkan oleh Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023. Namun, fluktuasi nilai pH dan konsentrasi nitrat yang mendekati batas maksimum menunjukkan adanya variasi kualitas air yang perlu dipantau lebih lanjut. Secara keseluruhan, air hujan yang ditampung dapat dianggap aman dari segi parameter kimia, namun tetap diperlukan pengolahan lebih lanjut untuk memastikan bahwa air tersebut layak dikonsumsi secara langsung oleh masyarakat.

Selain kontaminasi mikrobiologi, air hujan yang dipanen di Yordania juga mengandung zat kimia seperti klorida (Cl^-) dan nitrat (NO_3^-). Tingginya konsentrasi klorida berhubungan dengan sumber garam dari udara laut, sementara nitrat berasal dari aktivitas pertanian dan industri. (Abdulla & Al-Shareef, 2009)

Penelitian Singh & Kumar (2010) menemukan bahwa logam berat seperti timbal (Pb), merkuri (Hg), dan kadmium (Cd) ditemukan dalam konsentrasi yang signifikan di air hujan yang dipanen di beberapa kota di India. Polutan ini bersumber dari emisi kendaraan dan industri.

Penelitian-penelitian ini menunjukkan bahwa meskipun air hujan alami bersih, ia dapat dengan mudah terkontaminasi oleh berbagai akibat polusi udara, bahan atap, serta aktivitas industri dan lain. Pengelolaan air hujan yang dipanen perlu mempertimbangkan



metode penyaringan dan pengolahan yang tepat untuk menghindari bahaya kesehatan akibat kontaminasi kimia.

2.6.3 Analisis Risiko Kesehatan Paparan Mikrobiologi (*Total Coliform*, *E.coli*) Pada Penampungan Air Hujan

Kontaminasi mikrobiologi dalam air minum, terutama dari *Total Coliform* dan *Escherichia coli*, merupakan salah satu ancaman kesehatan masyarakat yang signifikan. *Total Coliform* adalah indikator utama adanya pencemaran organik, dan *E. coli* merupakan bakteri patogen yang berkaitan langsung dengan tinja, yang dapat menyebabkan infeksi saluran pencernaan. Menurut EPA (2012), air minum yang aman harus bebas dari bakteri-bakteri ini, dengan standar WHO yang menetapkan ambang batas 0 CFU/100 ml untuk *Total Coliform* dan *E. coli*.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa beberapa titik pengambilan air hujan di Kecamatan Bulagi Utara memiliki tingkat kontaminasi mikrobiologi yang tinggi. Tabel 6 menunjukkan bahwa titik VIII mencatat *Total Coliform* sebesar 2600 CFU/100 ml dan *E. coli* sebesar 100 CFU/100 ml. Nilai ini jauh melampaui batas aman yang direkomendasikan oleh WHO. Sebaliknya, beberapa titik lainnya seperti titik I dan III menunjukkan tingkat kontaminasi yang jauh lebih rendah, dengan nilai *E. coli* sebesar 0 CFU/100 ml. Penampungan air hujan di Kecamatan Bulagi Utara kemungkinan besar tidak dilengkapi dengan sistem filtrasi yang memadai. Hal ini dapat menjadi salah satu penyebab utama tingginya tingkat kontaminasi mikrobiologi, seperti yang terlihat dari tingginya kadar *Total Coliform* dan *E. coli* di beberapa titik, terutama di Titik VIII. Penampungan air yang terbuka atau kurang terawat meningkatkan risiko masuknya patogen melalui debu, kotoran, atau hewan yang kontak dengan air tersebut.

Penelitian ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Machdar (2013) di wilayah pedesaan menunjukkan hasil serupa, di mana air yang tidak diolah dengan baik seringkali terkontaminasi oleh *Total Coliform* dan *E. coli*. Wilayah-wilayah yang bergantung pada air hujan tanpa



sistem pengolahan yang memadai memiliki risiko infeksi yang tinggi, terutama bagi anak-anak dan orang tua yang lebih rentan terhadap penyakit yang ditularkan melalui air .

Konsumsi air hujan yang tercemar mikrobiologi di Kecamatan Bulagi Utara menunjukkan risiko kesehatan yang signifikan. Diperlukan langkah-langkah mitigasi seperti penerapan sistem pengolahan air sederhana dan penyuluhan kepada masyarakat mengenai pentingnya kebersihan sumber air. Hal ini sangat penting untuk mencegah penyakit yang disebabkan oleh air yang terkontaminasi, terutama di daerah-daerah yang sangat bergantung pada air hujan.

2.6.4 Analisis Risiko Kesehatan Paparan Kimia ((Nitrat, Cadmium, Fluorida, Timbal) Pada Penampungan Air Hujan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai Risk Quotient (RQ) untuk Nitrat (NO_3), Kadmium (Cd), Timbal (Pb), dan Fluorida (F) pada air hujan di Kecamatan Bulagi Utara berada dalam ambang batas aman ($\text{RQ} < 1$) untuk kelompok anak-anak maupun dewasa. Meskipun demikian, nilai RQ Fluorida pada anak-anak di Titik 1 mendekati batas risiko (0.67), sementara pada dewasa nilai tertinggi berada di Titik 1 sebesar 0.39. Hal ini menunjukkan bahwa Fluorida menjadi parameter dengan potensi risiko tertinggi dibandingkan parameter lainnya. Fluorida dalam konsentrasi tinggi diketahui dapat menyebabkan fluorosis gigi pada anak-anak, yang ditandai dengan perubahan warna dan struktur enamel, serta fluorosis tulang pada paparan jangka panjang. Temuan ini konsisten dengan penelitian oleh Dissanayake (1991), yang mengungkapkan bahwa risiko fluorosis meningkat pada lingkungan tropis yang mengandalkan air hujan sebagai sumber utama.

Paparan Nitrat (NO_3) menunjukkan nilai RQ yang jauh di bawah 1 semua titik sampling, baik pada anak-anak maupun dewasa. Nilai Nitrat tertinggi mencapai 0.226 mg/L, yang masih berada atas aman dibandingkan nilai RfD sebesar 1.6 mg/kg/hari. Dengan



demikian, risiko akut seperti methemoglobinemia yang umumnya terkait dengan Nitrat, terutama pada bayi dan anak-anak, tidak menjadi perhatian utama dalam studi ini. Penelitian oleh Ward et al. (2005) menunjukkan bahwa Nitrat dengan konsentrasi di bawah baku mutu jarang menyebabkan efek kesehatan akut. Namun, pemantauan jangka panjang diperlukan untuk mengantisipasi potensi akumulasi Nitrat, khususnya di daerah yang bergantung pada air hujan sebagai sumber utama air minum.

Timbal (Pb) menunjukkan nilai RQ yang rendah pada semua lokasi, dengan nilai tertinggi sebesar 0.077 pada anak-anak di Titik 1. Meskipun risiko langsung rendah, Timbal merupakan logam berat dengan potensi toksisitas kronis. Penelitian oleh Lanphear et al. (2005) menegaskan bahwa paparan Timbal dalam konsentrasi rendah sekalipun dapat menyebabkan kerusakan neurologis permanen, terutama pada anak-anak yang lebih rentan. Oleh karena itu, meskipun risiko yang teridentifikasi pada penelitian ini masih di bawah batas aman, penting untuk tetap memantau kadar Timbal secara berkala guna mencegah efek jangka panjang yang merugikan.

Paparan Kadmium (Cd) dalam penelitian ini memiliki nilai RQ yang sangat kecil, dengan nilai tertinggi hanya mencapai 0.004 pada anak-anak di Titik 7. Kadmium adalah logam berat yang memiliki efek toksik pada ginjal, tulang, dan sistem reproduksi manusia jika terpapar dalam waktu lama. Studi oleh USEPA (1985) menunjukkan bahwa paparan Kadmium kronis dapat memicu proteinuria sebagai tanda kerusakan ginjal. Dalam konteks penelitian ini, rendahnya nilai RQ menunjukkan bahwa risiko langsung Kadmium terhadap kesehatan masyarakat sangat rendah. Namun, karena Kadmium dapat terakumulasi di tubuh, pemantauan jangka panjang tetap relevan untuk mengantisipasi dampak kumulatif.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa air Kecamatan Bulagi Utara relatif aman untuk digunakan sebagai air minum dari segi parameter kimia yang diukur. Meskipun 1, Fluorida menunjukkan potensi risiko yang lebih tinggi



dibandingkan parameter lain, terutama pada kelompok anak-anak. Penelitian ini sejalan dengan temuan Singh et al. (2018), yang menekankan bahwa air hujan dapat menjadi sumber air alternatif yang aman jika pengelolaan kualitas air dilakukan secara memadai. Upaya mitigasi risiko seperti filtrasi air dan edukasi masyarakat tentang bahaya potensial perlu dilakukan untuk memastikan keberlanjutan penggunaan air hujan sebagai sumber air minum.

2.6.5 Tingkat Risiko Kesehatan Non-Karsinogenik dan Karsinogenik pada Penduduk akibat Paparan Mikrobiologi dan Paparan Kimia berdasarkan Target Hazard Quotient dan Target Cancer Risk di Kecamatan Bulagi Utara

Hasil analisis menunjukkan bahwa nilai Target Hazard Quotient (THQ) untuk paparan mikrobiologi (Total Coliform dan E.coli) dan kimia (Nitrat, Cadmium, Fluoride, Timbal) memberikan gambaran risiko kesehatan di Kecamatan Bulagi Utara. Untuk paparan mikrobiologi, Titik 5 dan Titik 8 memiliki nilai THQ E.coli yang signifikan pada anak-anak dan dewasa, mengindikasikan risiko tinggi kontaminasi mikrobiologis. Temuan ini sejalan dengan penelitian oleh Sharma et al. (2016) yang menunjukkan bahwa kehadiran E.coli dalam air minum menjadi indikator utama kontaminasi tinja yang dapat menyebabkan infeksi gastrointestinal, terutama pada anak-anak. Risiko lebih tinggi pada anak-anak disebabkan oleh sistem imun yang lebih rentan dibandingkan dewasa, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai THQ yang lebih besar pada kelompok ini.

Paparan kimia menunjukkan nilai THQ untuk Fluoride yang mendekati 1 di beberapa titik, seperti di Titik 1 untuk dewasa (0.39) dan anak-anak (0.26). Fluoride dalam konsentrasi tinggi diketahui dapat menyebabkan fluorosis gigi dan fluorosis tulang pada paparan jangka panjang. Penelitian oleh Mohan et al. (2020) mengonfirmasi bahwa fluorosis merupakan dampak awal yang umum terjadi di daerah dengan kadar yang tinggi dalam air, sementara fluorosis tulang berkembang paparan yang lebih lama dengan konsentrasi yang lebih tinggi.



Dengan nilai THQ mendekati ambang batas, pemantauan lebih lanjut dan intervensi untuk mengurangi kadar Fluoride dalam air sangat penting.

Nitrat menunjukkan nilai THQ yang jauh di bawah 1 untuk semua titik, dengan nilai tertinggi pada anak-anak di Titik 5 (0.026). Meskipun demikian, Nitrat dalam konsentrasi tinggi dapat menyebabkan methemoglobinemia pada individu yang rentan, terutama bayi dan anak-anak. Studi oleh Ward et al. (2018) menyoroti bahwa methemoglobinemia sering ditemukan pada komunitas yang mengandalkan air hujan atau air tanah dengan kadar Nitrat tinggi. Dalam penelitian ini, risiko terkait Nitrat rendah, tetapi potensi akumulasi pada jangka panjang tetap perlu diwaspadai.

Timbal dan Kadmium, meskipun memiliki nilai THQ yang rendah, tetap menjadi perhatian karena sifat toksiknya yang kumulatif. Timbal pada Titik 1 untuk anak-anak menunjukkan nilai THQ sebesar 0.029, sedangkan Kadmium memiliki nilai tertinggi sebesar 0.028 pada anak-anak di Titik 7. Timbal diketahui memengaruhi perkembangan sistem saraf pada anak-anak, bahkan pada konsentrasi rendah, sebagaimana diungkapkan oleh Lanphear et al. (2018). Kadmium, di sisi lain, memiliki potensi menyebabkan kerusakan ginjal dan osteoporosis pada paparan kronis, seperti yang dilaporkan oleh Jaishankar et al. (2019). Dengan sifat akumulatif kedua logam berat ini, risiko jangka panjang tetap menjadi perhatian utama, meskipun nilai THQ saat ini rendah.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa risiko kesehatan non-karsinogenik di Kecamatan Bulagi Utara masih berada dalam ambang batas aman, dengan pengecualian beberapa titik untuk Fluoride dan E.coli. Temuan ini mendukung studi oleh Singh et al. (2020), yang menyatakan bahwa air hujan dapat menjadi sumber air yang aman jika kualitasnya dikelola dengan baik. Langkah mitigasi seperti perbaikan sanitasi, filtrasi air, dan edukasi masyarakat diperlukan untuk mengurangi risiko paparan mikrobiologi dan kimia. Pemantauan jangka panjang terhadap parameter kritis seperti Fluoride dan logam berat sangat



penting untuk mencegah dampak kesehatan jangka panjang di masa mendatang.

2.7 Kesimpulan

1. Penelitian ini menunjukkan bahwa air hujan di Kecamatan Bulagi Utara memiliki tingkat kontaminasi mikrobiologi (Total Coliform dan *Escherichia coli*) yang signifikan di beberapa titik, dengan konsentrasi tertinggi ditemukan di Titik VIII (2.600 CFU/100 ml untuk Total Coliform). Sebagian besar parameter kimia seperti Nitrat, Kadmium, Timbal, dan Fluorida berada dalam batas aman, kecuali Nitrat di Titik VIII yang mendekati ambang batas dengan nilai 11,8 mg/L.
2. Tingkat risiko non-karsinogenik untuk anak-anak lebih tinggi dibandingkan dewasa, khususnya akibat paparan Fluorida dan Nitrat. Nilai Target Hazard Quotient (THQ) menunjukkan bahwa beberapa lokasi, seperti Titik VIII, memiliki potensi risiko terhadap kesehatan yang perlu dimitigasi.
3. Paparan Kadmium dan Timbal masih berada dalam ambang batas toleransi karsinogenik, baik untuk anak-anak maupun dewasa. Namun, perhatian khusus diperlukan untuk menghindari akumulasi jangka panjang dari bahan kimia ini yang dapat meningkatkan risiko kesehatan.

2.8 Saran

1. Diperlukan pemantauan kualitas air hujan secara rutin di seluruh lokasi penampungan, khususnya di titik dengan tingkat kontaminasi mikrobiologi dan kimia yang tinggi, seperti di Titik VIII. Pemantauan ini meliputi analisis parameter mikrobiologi (Total Coliform, *Escherichia coli*) dan kimia (Nitrat, Kadmium, Timbal, Fluorida) sesuai dengan standar baku mutu.



2. Pembangunan dan pemeliharaan infrastruktur penampungan air hujan yang lebih baik perlu dilakukan untuk mengurangi risiko kontaminasi. Hal ini dapat mencakup pemasangan sistem filtrasi pada skala rumah tangga untuk menghilangkan mikroorganisme patogen dan logam berat, serta pembuatan desain tangki air yang mengurangi risiko masuknya kontaminan eksternal.
3. Program edukasi dan penyuluhan tentang pentingnya pengelolaan air hujan yang higienis harus dilakukan. Masyarakat perlu diberikan informasi mengenai potensi risiko kesehatan akibat kontaminasi air, serta langkah-langkah sederhana yang dapat dilakukan, seperti pembersihan tangki secara berkala dan penggunaan sistem filtrasi.
4. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai dasar ilmiah untuk penyusunan kebijakan pengelolaan air hujan oleh pemerintah daerah. Kebijakan tersebut mencakup pengawasan kualitas air, regulasi penggunaan air hujan sebagai sumber air minum, dan pengembangan infrastruktur pengolahan air berbasis bahan lokal.
5. Peningkatan Kerjasama Multi-Pihak Pemerintah daerah, institusi kesehatan, lembaga penelitian, dan masyarakat perlu bekerja sama dalam meningkatkan pengelolaan air hujan. Kolaborasi ini penting untuk memastikan ketersediaan air bersih yang berkelanjutan sekaligus memitigasi risiko kesehatan yang muncul.

2.9 Daftar Pustaka

- Abdulla, F. A., & Al-Shareef, A. W. (2009). Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination*, 243(1–3), 195–207. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.013>
- Ahmed, W., Gardner, T., & Toze, S. (2011). Microbiological Quality of Roof-Harvested Rainwater and Health Risks: A Review. *Journal of Environmental Quality*, 40(1), 13–21. <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0345>
- Pac S., Maestre, J. P., Kinney, K. A., & Kirisits, M. J. (2019). An examination of the microbial community and occurrence of potential human pathogens in rainwater harvested from different roofing materials. *Water Research*, 159, 406–413. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.029>



- Donohue, M. J., Macomber, P. S. H., Okimoto, D., & Lerner, D. T. (2017). Survey of Rainwater Catchment Use and Practices on Hawaii Island. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 161(1), 33–47. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704x.2017.3250.x>
- Egodawatta, P., Thomas, E., & Goonetilleke, A. (2009). Understanding the physical processes of pollutant build-up and wash-off on roof surfaces. *Science of the Total Environment*, 407(6), 1834–1841. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.027>
- Franklin, L. J., Fielding, J. E., Gregory, J., Gullan, L., Lightfoot, D., Poznanski, S. Y., & Vally, H. (2009). An outbreak of *Salmonella* Typhimurium 9 at a school camp linked to contamination of rainwater tanks. *Epidemiology and Infection*, 137(3), 434–440. <https://doi.org/10.1017/S095026880800109X>
- García-Montoya, M., Bocanegra-Martínez, A., Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2015). Simultaneous design of water reusing and rainwater harvesting systems in a residential complex. *Computers and Chemical Engineering*, 76, 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.02.011>
- Hamilton, K. A., Ahmed, W., Palmer, A., Sidhu, J. P. S., Hodggers, L., Toze, S., & Haas, C. N. (2016). Public health implications of *Acanthamoeba* and multiple potential opportunistic pathogens in roof-harvested rainwater tanks. *Environmental Research*, 150, 320–327. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.06.017>
- Harsoyo, B. (2010). Teknik Pemanenan Air Hujan (Rain Water Harvesting) Sebagai Alternatif Upaya Penyelamatan Sumberdaya Air Di Wilayah Dki Jakarta. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 11(2), 29. <https://doi.org/10.29122/jstmc.v11i2.2183>
- Helmreich, B., & Horn, H. (2009). Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*, 248(1–3), 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.046>
- Huston, R., Chan, Y. C., Chapman, H., Gardner, T., & Shaw, G. (2012). Source apportionment of heavy metals and ionic contaminants in rainwater tanks in a subtropical urban area in Australia. *Water Research*, 46(4), 1121–1132. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.008>
- Koplan, J. P., Deen, R. D., Swanston, W. H., & Tota, B. (1978). Contaminated roof-collected rainwater as a possible cause of an outbreak of salmonellosis. *Journal of Hygiene*, 81(2), 303–309. <https://doi.org/10.1017/S0022172400025146>
- Lee, J. Y., Yang, J. S., Han, M., & Choi, J. (2010). Comparison of the microbiological and chemical characterization of harvested rainwater and reservoir water as alternative water resources. *Science of the Total Environment*, 408(4), 896–905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.001>



- Leong, J. Y. C., Chong, M. N., Poh, P. E., Hermawan, A., & Talei, A. (2017). Longitudinal assessment of rainwater quality under tropical climatic conditions in enabling effective rainwater harvesting and reuse schemes. *Journal of Cleaner Production*, 143, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.149>
- Mendez, C. B., Klenzendorf, J. B., Afshar, B. R., Simmons, M. T., Barrett, M. E., Kinney, K. A., & Kirisits, M. J. (2011). The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. *Water Research*, 45(5), 2049–2059. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.015>
- Nalwanga, R., Muyanja, C. K., McGuigan, K. G., & Quilty, B. (2018). A study of the bacteriological quality of roof-harvested rainwater and an evaluation of SODIS as a suitable treatment technology in rural Sub-Saharan Africa. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 6(3), 3648–3655. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.008>
- Palla, A., Gnecco, I., & La Barbera, P. (2017). The impact of domestic rainwater harvesting systems in storm water runoff mitigation at the urban block scale. *Journal of Environmental Management*, 191, 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.025>
- Panas, A., Comouth, A., Saathoff, H., Leisner, T., Al-Rawi, M., Simon, M., Seemann, G., D??ssel, O., M??lhopt, S., Paur, H. R., Fritsch-Decker, S., Weiss, C., & Diabat??, S. (2014).
- Abdulla, F. A., & Al-Shareef, A. W. (2009). Roof rainwater harvesting systems for household water supply in Jordan. *Desalination*, 243(1–3), 195–207. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.013>
- Ahmed, W., Gardner, T., & Toze, S. (2011). Microbiological Quality of Roof-Harvested Rainwater and Health Risks: A Review. *Journal of Environmental Quality*, 40(1), 13–21. <https://doi.org/10.2134/jeq2010.0345>
- Bae, S., Maestre, J. P., Kinney, K. A., & Kirisits, M. J. (2019). An examination of the microbial community and occurrence of potential human pathogens in rainwater harvested from different roofing materials. *Water Research*, 159, 406–413. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.029>
- Donohue, M. J., Macomber, P. S. H., Okimoto, D., & Lerner, D. T. (2017). Survey of Rainwater Catchment Use and Practices on Hawaii Island. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, 161(1), 33–47. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704x.2017.3250.x>
- Egodawatta, P., Thomas, E., & Goonetilleke, A. (2009). Understanding the physical processes of pollutant build-up and wash-off on roof surfaces. *Science of the Total Environment*, 407(6), 1834–1841. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.12.027>
- Fielding, J. E., Gregory, J., Gullan, L., Lightfoot, D., oznanski, S. Y., & Vally, H. (2009). An outbreak of Salmonella yphimurium 9 at a school camp linked to contamination of rainwater tanks. *Epidemiology and Infection*, 137(3), 434–440. <https://doi.org/10.1017/S095026880800109X>



- García-Montoya, M., Bocanegra-Martínez, A., Nápoles-Rivera, F., Serna-González, M., Ponce-Ortega, J. M., & El-Halwagi, M. M. (2015). Simultaneous design of water reusing and rainwater harvesting systems in a residential complex. *Computers and Chemical Engineering*, 76, 104–116. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.02.011>
- Hamilton, K. A., Ahmed, W., Palmer, A., Sidhu, J. P. S., Hodggers, L., Toze, S., & Haas, C. N. (2016). Public health implications of *Acanthamoeba* and multiple potential opportunistic pathogens in roof-harvested rainwater tanks. *Environmental Research*, 150, 320–327. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.06.017>
- Harsoyo, B. (2010). Teknik Pemanenan Air Hujan (Rain Water Harvesting) Sebagai Alternatif Upaya Penyelamatan Sumberdaya Air Di Wilayah Dki Jakarta. *Jurnal Sains & Teknologi Modifikasi Cuaca*, 11(2), 29.
- Helmreich, B., & Horn, H. (2009). Opportunities in rainwater harvesting. *Desalination*, 248(1–3), 118–124. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.05.046>
- Huston, R., Chan, Y. C., Chapman, H., Gardner, T., & Shaw, G. (2012). Source apportionment of heavy metals and ionic contaminants in rainwater tanks in a subtropical urban area in Australia. *Water Research*, 46(4), 1121–1132. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.12.008>
- Koplan, J. P., Deen, R. D., Swanston, W. H., & Tota, B. (1978). Contaminated roof-collected rainwater as a possible cause of an outbreak of salmonellosis. *Journal of Hygiene*, 81(2), 303–309. <https://doi.org/10.1017/S0022172400025146>
- Lee, J. Y., Yang, J. S., Han, M., & Choi, J. (2010). Comparison of the microbiological and chemical characterization of harvested rainwater and reservoir water as alternative water resources. *Science of the Total Environment*, 408(4), 896–905. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.11.001>
- Leong, J. Y. C., Chong, M. N., Poh, P. E., Hermawan, A., & Talei, A. (2017). Longitudinal assessment of rainwater quality under tropical climatic conditions in enabling effective rainwater harvesting and reuse schemes. *Journal of Cleaner Production*, 143, 64–75. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.149>
- Mendez, C. B., Klenzendorf, J. B., Afshar, B. R., Simmons, M. T., Barrett, M. E., Kinney, K. A., & Kirisits, M. J. (2011). The effect of roofing material on the quality of harvested rainwater. *Water Research*, 45(5), 2049–2059. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2010.12.015>
- Nalwanga, R., Muyanja, C. K., McGuigan, K. G., & Quilty, B. (2018). A study of the bacteriological quality of roof-harvested rainwater and an evaluation of SODIS as a suitable treatment technology in rural Sub-Saharan Africa. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 3(3), 3648–3655. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.12.008>



- Palla, A., Gnecco, I., & La Barbera, P. (2017). The impact of domestic rainwater harvesting systems in storm water runoff mitigation at the urban block scale. *Journal of Environmental Management*, 191, 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.01.025>
- Panas, A., Comouth, A., Saathoff, H., Leisner, T., Al-Rawi, M., Simon, M., Seemann, G., D??ssel, O., M??lhopt, S., Paur, H. R., Fritsch-Decker, S., Weiss, C., & Diabat??, S. (2014). Atmospheric Deposition : Sampling Procedures , Analytical Methods , and Main Recent Findings from the Scientific Literature. *Advances in Meteorology*, 5(1), 1590–1602.
- Park Won Bae. (2016). *Effective Improvement of Rainwater Management Facility*.
- Permenkes RI. (2023). Peraturan Menteri Kesehatan RI No 2 Tahun 2023 Tentang Peraturan Pelaksanaan PP No 66 Tahun 2014 Tentang Kesehatan Lingkungan. *Jdih.Kemkes.Go.Id*, 1–179.
- Rahaman, M. F., Jahan, C. S., & Mazumder, Q. H. (2019). Rainwater harvesting: Practiced potential for Integrated Water Resource Management in drought-prone Barind Tract, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*, 9(March), 100267. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100267>
- Sánchez, A. S., Cohim, E., & Kalid, R. A. (2015). A review on physicochemical and microbiological contamination of roof-harvested rainwater in urban areas. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 6, 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.swaqe.2015.04.002>
- Waso, M., Khan, S., & Khan, W. (2018). Microbial source tracking markers associated with domestic rainwater harvesting systems: Correlation to indicator organisms. *Environmental Research*, 161(November 2017), 446–455. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.043>
- Zhu, K., Zhang, L., Hart, W., Liu, M., & Chen, H. (2004). Quality issues in harvested rainwater in arid and semi-arid Loess Plateau of northern China. *Journal of Arid Environments*, 57(4), 487–505. [https://doi.org/10.1016/S0140-1963\(03\)00118-6](https://doi.org/10.1016/S0140-1963(03)00118-6)
- Atmospheric Deposition : Sampling Procedures , Analytical Methods , and Main Recent Findings from the Scientific Literature. *Advances in Meteorology*, 5(1), 1590–1602.
- Park Won Bae. (2016). *Effective Improvement of Rainwater Management Facility*.
- Permenkes RI. (2023). Peraturan Menteri Kesehatan RI No 2 Tahun 2023 Tentang Peraturan Pelaksanaan PP No 66 Tahun 2014 Tentang Kesehatan Lingkungan. *Jdih.Kemkes.Go.Id*, 1–179.
- Rahaman, M. F., Jahan, C. S., & Mazumder, Q. H. (2019). Rainwater harvesting: Practiced potential for Integrated Water Resource Management in drought-prone Barind Tract, Bangladesh. *Groundwater for Sustainable Development*, 9(March), 100267. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100267>



- Sánchez, A. S., Cohim, E., & Kalid, R. A. (2015). A review on physicochemical and microbiological contamination of roof-harvested rainwater in urban areas. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 6, 119–137. <https://doi.org/10.1016/j.swaqe.2015.04.002>
- Waso, M., Khan, S., & Khan, W. (2018). Microbial source tracking markers associated with domestic rainwater harvesting systems: Correlation to indicator organisms. *Environmental Research*, 161(November 2017), 446–455. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2017.11.043>
- Zhu, K., Zhang, L., Hart, W., Liu, M., & Chen, H. (2004). Quality issues in harvested rainwater in arid and semi-arid Loess Plateau of northern China. *Journal of Arid Environments*, 57(4), 487–505.

