

**ANALISIS RISIKO KESEHATAN LINGKUNGAN PENCEGAHAN
PENCEMARAN PADA AIR MINUM MASYARAKAT DI KAWASAN
KARST BANGGAI KEPULAUAN**

***ENVIRONMENTAL HEALTH RISK ANALYSIS IN PREVENTION
COMMUNITY DRINKING WATER POLLUTION IN THE KARST AREA
OF THE BANGGAI ISLANDS***



**FERDY SALAMAT
NIM. K013211026**



**PROGRAM DOKTOR ILMU KESEHATAN MASYARAKAT
FAKULTAS KESEHATAN MASYARAKAT
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

**ANALISIS RISIKO KESEHATAN LINGKUNGAN PENCEGAHAN
PENCEMARAN PADA AIR MINUM MASYARAKAT DI KAWASAN KARST
BANGGAI KEPULAUAN**

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk mencapai gelar doktor

Program Studi Doktor Ilmu Kesehatan Masyarakat

Disusun dan diajukan oleh

FERDY SALAMAT
NIM. K013211026

Kepada

**PROGRAM DOKTOR ILMU KESEHATAN MASYARAKAT
FAKULTAS KESEHATAN MASYARAKAT
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2024**

DISERTASI

**ANALISIS RISIKO KESEHATAN LINGKUNGAN PENCEGAHAN PENCEMARAN
PADA AIR MINUM MASYARAKAT DI KAWASAN KARST BANGGAI KEPULAUAN**

FERDY SALAMAT

K013211026


telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian Doktor pada tanggal Tujuh
bulan Maret tahun Dua Ribu Dua Puluh Empat dan dinyatakan telah
memenuhi syarat kelulusan

pada

Program Studi Doktor Ilmu Kesehatan Masyarakat
Fakultas Kesehatan Masyarakat
Universitas Hasanuddin
Makassar

Mengesahkan:


Promotor


Prof. Dr. Anwar Daud, SKM., M.Kes
NIP. 19661012 199303 1 002


Ko-Promotor


Dr. Agus Bintara Birawida, S.Kel., M.Kes
NIP. 19820803 200812 1 003


Ketua Program Studi S3
Ilmu Kesehatan Masyarakat,


Prof. Dr. Aminuddin Syam, SKM., M.Kes., M.Med.Ed
NIP. 19670617 199903 1 001

Ko-Promotor,


Prof. Dr. Ir. Amran Achmad, M.Sc
NIP. 19570620 198503 1 002

Dekan Fakultas Kesehatan Masyarakat
Universitas Hasanuddin,



Prof. Sukri Palutturi, SKM., M.Kes., M.Sc., Ph.D
NIP. 19720529 200112 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI DAN PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa, disertasi berjudul “Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Pencegahan Pencemaran pada Air Minum Masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan” adalah benar karya saya dengan arahan dari tim pembimbing (Prof. Dr. Anwar Daud, SKM., M.Kes sebagai Promotor dan Dr. Agus Bintara Birawida sebagai co-promotor-1 serta Prof. Dr. Ir. Amran Achmad, M.Sc sebagai co-promotor-2). Karya ilmiah ini belum diajukan dan tidak sedang diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka disertasi ini. Sebagian dari isi disertasi ini telah dipublikasikan di Jurnal (Pharmacognosy Journal; Vol 16, Issue 1, Jan-Feb, 2024, DOI: 10.5530/pj.2024.16.34) sebagai artikel dengan judul “Microbial Quantitative Risk Assessment in Springs as Community Drinking Water Sources in the Banggai Islands Karst Area, Central Sulawesi” dan di Jurnal (Pharmacognosy Journal, Vol 15, Issue 6 (Suppl), Nov-Dec, 2023, DOI: 10.5530/pj.2023.15) dengan judul artikel “Does Land-Use Associate with Escherichia coli Pollution in Karst Springs? A Review of the Literature”. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan disertasi ini adalah karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut berdasarkan aturan yang berlaku.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta (hak ekonomis) dari karya tulis saya berupa disertasi ini kepada Universitas Hasanuddin.

Makassar, Maret 2024



Ferdy Salamat
NIM. K013211026

UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena berkat Rahmat dan KaruniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan penulisan naskah disertasi dengan judul “**Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Pencegahan Pencemaran pada Air Minum Masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan**”. Penulisan disertasi ini merupakan salah satu prasyarat untuk memperoleh gelar akademik Doktor pada Program Doktor Ilmu Kesehatan Masyarakat Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin Makassar.

Penulis menyadari bahwa naskah hasil penelitian ini dapat diselesaikan berkat dukungan dan berbagai pihak, oleh karena itu penulis menyampaikan terima kasih yang tak terhingga dan penghargaan setinggi-tingginya kepada Prof. Dr. Anwar Daud, SKM., M.Kes., selaku Promotor yang selalu memberikan motivasi dengan penuh perhatian dan kesabaran dalam membimbing serta memberikan saran dalam penyusunan naskah hasil penelitian ini. Penulis juga mengucapkan banyak terima kasih kepada Dr. Agus Bintara Birawida, S.Kel., M.Kes., selaku Ko-Promotor 1, dan kepada Prof. Dr. Ir. Amran Achmad, M.Sc., selaku Ko-Promotor 2, atas bimbingan, motivasi dan masukan yang diberikan selama penyusunan naskah hasil penelitian ini.

Saya mengucapkan berlimpah terima kasih kepada mereka. Penghargaan yang tinggi juga saya sampaikan kepada Bapak Kepala DPM PTSP Kab. Banggai Kepulauan yang telah mengizinkan kami untuk melaksanakan penelitian di lapangan, dan kepada Kepala BBLK Makassar atas kesempatan untuk menggunakan fasilitas dan peralatan di Laboratorium Kesehatan Makassar.

Kepada Bupati Banggai Kepulauan dan Sekretaris Kabupaten Banggai Kepulauan, saya mengucapkan terima kasih atas izin belajar yang diberikan selama menempuh program pendidikan doktor. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada:

1. Prof. Dr. Ir. Jamaluddin Jompa, M.Sc., selaku Rektor Universitas Hasanuddin Makassar atas kesempatan dan fasilitas yang diberikan untuk mengikuti dan menyelesaikan pendidikan Doktoral Ilmu Kesehatan Masyarakat di Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin Makassar.
2. Prof. Sukri Palutturi, SKM., M.Kes., M.Sc.PH., Ph.D., selaku Dekan, Dr. Wahiduddin, SKM., M.Kes., selaku Wakil Dekan 1, Prof. Dr. Atjo Wahyu, SKM., M.Kes., selaku Wakil Dekan II., Prof. Anwar Malongi, SKM., M.Sc., Ph.D., selaku Wakil Dekan III Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin Makassar.

3. Prof. Dr. Aminuddin Syam, S. KM., M. Kes., M. Med.Ed., Selaku Ketua Program Studi Doktoral (S3) Ilmu Kesehatan Masyarakat Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin Makassar.
4. Dr. Langgeng Wahyu Santoso, S.Si., M.Si., Prof. Dr. dr. H. Muh. Safar, MS., Prof. Dr. Ridwan Amiruddin, SKM., M.Kes., M.Sc.PH., Prof. Dr. Stang, M.Kes., Dosen Penguji Seminar Proposal atas segala saran, masukan dan kritikan yang diberikan sebagai perbaikan masukan proposal disertasi ini.
5. Dosen dan tenaga kependidikan pada Program S3 (Doktoral) Ilmu Kesehatan masyarakat Fakultas Kesehatan Masyarakat Universitas Hasanuddin Makassar.
6. Orang tua tercinta saya mengucapkan limpah terima kasih dan sembah sujud atas doa, pengorbanan dan motivasi mereka selama saya menempuh pendidikan. Penghargaan yang besar juga saya sampaikan kepada isteri tercinta Meilan Noviana (Almarhumah), anak – anak tercinta Raka Adyatma Sehat dan Prayoga Adikara Sehat dan seluruh keluarga atas motivasi dan dukungan yang tak ternilai.
7. Teman-teman mahasiswa Program S3 Ilmu Kesehatan Masyarakat Angkatan Tahun 2021 baik kelas reguler maupun kelas kerjasama, terima kasih senantiasa berbagi ilmu, pengalaman dan motivasi dengan penulis .
8. Kepada semua pihak yang telah memberikan dorongan dan motivasi serta masukan saran yang tidak dapat disebutkan satu persatu demi penyempurnaan naskah proposal disertasi ini.

Makassar, Maret 2024

Penulis

Ferdy Sehat
NIM. K013211026

ABSTRAK

FERDY SALAMAT. **Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Pencegahan Pencemaran pada Air Minum Masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan.** (dibimbing oleh Anwar Daud, Agus Bintara Birawida dan Amram Achmad).

Latar belakang. Kawasan Karst merupakan salah satu wilayah yang rentan terhadap pencemaran bahan kimia berbahaya seperti logam berat dan mikrobiologi. **Tujuan.** Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi kondisi lingkungan sekitar mata air dan analisis risiko kesehatan masyarakat serta merumuskan manajemen risiko kesehatan lingkungan pada air minum masyarakat. **Metode.** Penelitian ini merupakan penelitian observasional dengan rancangan *Cross Sectional* melalui pendekatan metode analisis spasial untuk mengidentifikasi kondisi penggunaan lahan dan luas daerah tangkapan air (DTA) mata air, metode *Environmental Health Risk Assessment (EHRA)* dan metode *Quantitative Microbial Risk Assesment (QMRA)* untuk menilai atau memprakirakan besaran risiko kesehatan manusia yang disebabkan oleh paparan berbahaya pada 4 mata air yaitu mata air Paisu Sinangkal, Paisu Olulan, Paisu Lalomo dan Paisu Taabak dengan jumlah sampel 230 responden. **Hasil.** Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan lahan di daerah tangkapan air (DTA) mata air terdiri dari hutan sekunder, kebun campuran, semak belukar, dan pemukiman masyarakat yang terlibat dalam aktivitas pertanian, perkebunan, peternakan, dan domestik. Semua mata air positif mengandung bakteri *coliform* dan *Enterococcus*, dan logam berat Arsen (As) dapat menyebabkan gangguan kesehatan non-karsinogen RQ lebih dari 1. Untuk mengendalikan risiko paparan Arsen (As) dan mikrobiologi pada mata air, kita dapat mengontrol laju asupan dan durasi paparan, menentukan batas aman konsentrasi, dan memberi tahu stakeholder tentang risiko yang terkait dengan menjaga daerah tangkapan air dan mengubah kualitas air dari sumber air minum hingga dapat dikonsumsi masyarakat. **Kesimpulan.** Strategi pengelolaan risiko pencemaran sumber air minum masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan sebagai upaya untuk memulihkan, menjaga serta melindungi daerah tangkapan air dan air yang dihasilkannya, baik kualitas, kuantitas maupun kontinuitas dari paparan logam berat dan mikrobiologi.

Kata Kunci: EHRA, QMRA, Manajemen Risiko, Mata Air, Kawasan Karst.



ABSTRACT

FERDY SALAMAT. **Environmental Health Risk Analysis in Prevention Community Drinking Water Pollution in the Karst Area of the Banggai Islands.** (Supervised by Anwar Daud, Agus Bintara Birawida and Amram Achmad).

Background. Karst is one area vulnerable to pollution by harmful chemicals such as heavy metals and microbiology. **Aim.** This study aims to identify environmental conditions around springs, analyze public health risks, and manage ecological health risks in community drinking water containing heavy metals and microbiology. **Method.** This research employs a cross-sectional design and an observational method to determine the land use conditions and spring catchment area. It also uses a spatial analysis method, the Environmental Health Risk Assessment (EHRA), and the Quantitative Microbial Risk Assessment (QMRA) method to evaluate or estimate the risk to human health posed by hazardous exposure to four springs: the Paisu Sinangkal, Olulan, Lalomo, and Taabak springs. The study includes 230 respondents. **Results.** The findings indicated that secondary forests, mixed gardens, shrubs, and community settlements with agricultural, plantation, livestock, and household activities are the land uses in the spring catchment area. Arsenic (As), a heavy metal, can result in non-cancerous health issues. $RQ > 1$, and Enterococcus and coliform bacteria are present in every spring water. Controlling the rate of intake or duration of exposure, establishing safe concentration limits, and informing stakeholders of the risks associated with safeguarding water catchment areas and preparing drinking water sources for public consumption are some ways to manage risk resulting from exposure to microbiology and arsenic (As) in spring water. **Conclusion.** The risk management strategy for pollution of community drinking water sources in the Banggai Islands Karst Area is to restore, maintain, and preserve the quality, quantity, and continuity of the water produced by the catchment area by shielding it from mikrobiological and heavy metal contamination.

Keywords: EHRA, QMRA, Risk Management, Springs, Karst Area



DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGANTAR	ii
LEMBARAN PENGESAHAN	iii
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN DISERTASI	iv
UCAPAN TERIMA KASIH	v
ABSTRAK.....	vii
<i>ABSTRACT</i>	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiii
DAFTAR SINGKATAN, ISTILAH DAN LAMBANG	ix
BAB I PENDAHULUAN UMUM	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Kegunaan Penelitian.....	6
1.5 Ruang Lingkup Penelitian	7
1.6 Kebaruan Penelitian.....	7
1.7 Desain Konseptual.....	8
BAB II Topik Penelitian I	12
2.1 Abstrak	12
2.2 Pendahuluan	12
2.3 Metode	13
2.4 Hasil dan Pembahasan.....	17
2.5 Kesimpulan	36
2.6 Daftar Pustaka	36
BAB III Topik Penelitian II	39
3.1 Abstrak	39
3.2 Pendahuluan	39
3.3 Metode	41

3.4 Hasil dan Pembahasan	50
3.5 Kesimpulan	58
3.6 Daftar Pustaka	59
BAB IV Topik Penelitian III	62
4.1 Abstrak	62
4.2 Pendahuluan	62
4.3 Metode	65
4.4 Hasil dan Pembahasan	71
4.5 Kesimpulan	78
4.6 Daftar Pustaka	78
BAB V PEMBAHASAN UMUM	82
BAB VI KESIMPULAN UMUM	109
DAFTAR PUSTAKA	113
LAMPIRAN	125

DAFTAR TABEL

No Urut	Halaman
1.	Lokasi Penelitian di Kabupaten Banggai Kepulauan 13
2.	Nama, Lokasi, Debit dan Pemanfaatan Mata Air di Kawasan Karst Banggai Kepulauan 14
3.	Karakteristik, Elevasi, dan Formasi Batuan Mata Air di Lokasi Penelitian. 20
4.	Debit, Luas Daerah Tangkapan Air (DTA) Mata Air dan Tutupan/ Pergunaan Lahan 21
5.	Uraian Langkah Identifikasi Bahaya 46
6.	Penjelasan Notasi dan Satuan Rumus <i>Intake Ingesti</i> 48
7.	Distribusi Frekuensi Berdasarkan Kandungan Logam Berat 51
8.	Distribusi Rata-Rata Asupan (<i>Intake</i>) Berdasarkan Kandungan Logam Berat 52
9.	Penentuan Batas Aman Konsentrasi Logam Berat Arsenik (As) Pada Mata Air Kawasan Karst Banggai Kepulauan 55
10.	Penentuan Jumlah Konsumsi Aman Konsentrasi Logam Berat Arsenik (As) Pada Mata Air Kawasan Karst Banggai Kepulauan 56
11.	Distribusi Frekuensi Berdasarkan Kandungan Mikrobiologi 71
12.	Distribusi Paparan Rata-Rata Patogen 72
13.	Distribusi Analisis Rata-Rata Dosis-Respon 72
14.	Distribusi Analisis <i>Probability of infection</i> (Pinf) 73
15.	Distribusi Analisis <i>Probability of infection/year</i> 74
16.	Distribusi Analisis <i>Probability of infection/year</i> 74
17.	Distribusi Analisis <i>Probability of infection/year</i> 75
18.	Manajemen Risiko Paparan Logam Berat dan Mikrobiologi pada Sumber Air Minum Masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan .. 102

DAFTAR GAMBAR

No Urut	Halaman
1. Skema Fungsi Akuifer Karst.....	8
2. Kerangka Teori Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan Logam Berat	9
3. Kerangka Teori Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan Mikroba	10
4. Kerangka Konsep Penelitian	11
5. Alur Penelitian Topik Penelitian I.....	17
6. Peta Administrasi Kabupaten Banggai dan Kepulauan	18
7. Peta Geologi Kabupaten Banggai Kepulauan.....	20
8. Peta tutupan lahan dan daerah tangkapan air	21
9. Pemanfaatan Mata Air dan kondisi Lingkungan di sekitar Mata Air Paisu Lalomo.....	23
10. Peta Daerah Tangkapan Air (DTA) Mata Air dan Penampakan 3 Dimensi DTA Mata Air Paisu Lalomo	24
11. Pemanfaatan Mata Air dan kondisi Lingkungan di sekitar Mata Air Paisu Olulan	25
12. Peta Daerah Tangkapan Air (DTA) Mata Air dan Penampakan 3 Dimensi DTA Mata Air Paisu Olulan	26
13. Pemanfaatan Mata Air dan kondisi Lingkungan di sekitar Mata Air Paisu Taabak.....	27
14. Peta daerah tangkapan air (DTA) mata air Paisu Taabak	28
15. Pemanfaatan Mata Air dan kondisi Lingkungan di sekitar Mata Air Paisu Sinangkal.....	29
16. Peta daerah tangkapan air (DTA) mata air Paisu Sinangkal	30
17. Proses <i>Risk Assessment</i>	46
18. Alur Penelitian Topik Penelitian II.....	50
19. Grafik Distribusi Frekuensi Berdasarkan Kandungan Logam Berat	51
20. Grafik Tingkatan Risiko Responden Berdasarkan Logam Berat	53
21. Peta Distribusi Risiko Arsen (As) pada Air Minum di Kawasan Karst Kabupaten Banggai Kepulauan.....	54
22. Alur Penelitian Topik Penelitian III.....	70
23. Distribusi Frekuensi Berdasarkan Kandungan Mikrobiologi	71
24. Model Ruang Terbuka Hijau dalam Perlindungan Mata Air di Kawasan Karst Banggai Kepulauan.....	107

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Lembar Penjelasan untuk Responden
Lampiran 2	<i>Informed Consent</i> (Persetujuan Setelah Penjelasan)
Lampiran 3	Formulir Persetujuan Informan
Lampiran 4	Kuesioner
Lampiran 5	Hasil Perhitungan ARKL
Lampiran 6	Hasil Perhitungan QMRA
Lampiran 7	Hasil Uji Laboratorium
Lampiran 8	Dokumentasi Penelitian
Lampiran 9	Peta-Peta Penelitian

DAFTAR SINGKATAN

ARKL	Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan
QMRA	<i>Quantitative Microbial Risk Assessment</i>
SDGs	<i>Sustainable Development Goals</i>
Hg	Mercury
As	Arsenic
Cd	Cadmium
Cr VI	Chromium heksavalen
Pb	Timbal
EHRA	<i>Environmental Health Risk Assessment</i>
ECR	<i>Excess Cancer Risk</i>
US-EPA	<i>Integrated Risk Information Sistem</i>
Cal-EPA	<i>California Environmental Protection Agency</i>
RfD	Reference dose
RfC	Reference Concentration
SF	<i>Slope Factor</i>
I	<i>Intake</i>
C	<i>Concentration</i>
R	<i>Rate</i>
fE	<i>frecuency of Exposure</i>
Dt	<i>Duration time</i>
Wb	<i>Weight of body</i>
t avg	<i>time average</i>
RC	<i>Risk Characterization</i>
RQ	<i>Risk Quotient</i>
ECR	<i>Excess Cancer Risk</i>
D-R	Dosis-Respon
AAS	<i>Atomic Absorption Spectrometry</i>
mm	milimeter
ha	Hektar
mdpl	Meter diatas permukaan laut
DTA	Daerah Tangkapan Air
DENMAS	Digital Elevation Model Nasional
SNI	Standar Nasional Indonesia
BIG	Badan Informasi Geospasial
BBLK	Balai Besar Laboratorium Kesehatan
PDAM	Perusahaan Daerah Air Minum

BAB I PENDAHULUAN UMUM

1.1. Latar Belakang

Air minum merupakan salah satu kebutuhan manusia untuk memenuhi standar kehidupan manusia secara sehat. Ketersediaan air yang terjangkau dan berkelanjutan menjadi bagian terpenting bagi setiap individu baik yang tinggal di perkotaan maupun di perdesaan. Lebih dari 2 miliar orang tinggal di negara-negara yang kekurangan air yang diakibatkan dari perubahan iklim dan pertumbuhan penduduk. Secara global, setidaknya 2 miliar orang menggunakan sumber air minum yang terkontaminasi tinja sebagai akibat dari kontaminasi feses merupakan risiko terhadap kualitas air minum. Demikian juga logam berat sangat beracun bahkan digunakan dalam konsentrasi rendah, sangat tidak aman bagi kesehatan manusia, dan menghasilkan stres oksidatif setelah masuk melalui rantai makanan baik melalui sumber alami maupun antropogenik. Selain itu, logam berat juga menyebabkan sirosis hati, disfungsi ginjal, keterbelakangan mental, kerusakan SSP, gangguan kardiovaskular, infertilitas, dan degenerasi ganglia basal otak dan akhirnya menyebabkan kematian. (Guo & Jiang, 2020; Clarke, Peyton, Healy, Fenton, & Cummins, 2017; Savio et al., 2018; M. I. Atta et al., 2023).

Pengambilan atau pemanfaatan air tanah dan mata air untuk memenuhi berbagai kebutuhan dari tahun ke tahun selalu meningkat, sejalan dengan meningkatnya jumlah penduduk dan meningkatnya kebutuhan masyarakat (Buckerfield, Quilliam, Bussiere, Waldron, Naylor, Li, & Oliver, 2020; Z. Liu & Liu, 2021). Kebutuhan air yang selalu meningkat menyebabkan manusia lupa bahwa daya dukung dan daya tampung lingkungan ada batasnya dalam memenuhi kebutuhan air, baik kebutuhan domestik maupun untuk kebutuhan lain seperti industri, pertanian dan perkotaan (Masroor, Kermani, Gholami, Fanaei, Arfaeinia, Nemati, & Tahmasbizadeh, 2020; Schiperski, 2018).

Pemanfaatan air tanah dan mata air jika tidak segera diantisipasi, dikhawatirkan akan menimbulkan dampak yang sangat merugikan, misalnya penurunan muka air tanah dan debit mata air, pencemaran kualitas air tanah dan mata air, intrusi air laut di daerah pesisir serta penurunan muka tanah (*subsidence*) akibat pengambilan air tanah yang melampaui batas kemampuan akuifernya (Lorette, Peyraube, Lastennet, Denis, Sabidussi, Fournier, Viennet, Gonand, & Villanueva, 2020; Rogers et al., 2020). Penggunaan lahan yang tidak tepat dapat menurunkan kualitas air, meningkatnya volume dan kecepatan air permukaan, meningkatnya banjir, meningkatnya aliran air dari kawasan hutan yang rusak, serta menyebabkan hilangnya lapisan permukaan tanah dan mengakibatkan penurunan volume air tanah (Song, Yang, Wang, Liu, & Liu, 2020; L. Liu, 2021).

Karst adalah istilah untuk kawasan dengan batuan gamping atau batu kapur yang dicirikan oleh adanya drainase permukaan yang langka atau tidak

adanya sungai, solum tanah yang tipis dan hanya setempat-setempat, terdapatnya cekungan-cekungan tertutup (*doline*), serta keberadaan sistem drainase atau sungai bawah tanah yang lebih dominan dibandingkan dengan sistem aliran permukaan. Kawasan Karst mempunyai kondisi hidrologi yang khas sebagai akibat dari batuan kapur yang mudah larut dan mempunyai porositas sekunder yang berkembang baik (Cahyadi. A, 2013;Adji, 2017).

Luas kawasan karst di dunia diperkirakan antara 7% - 10% dari luas permukaan bumi, di Indonesia kawasan karst mencakup sekitar 20% dari total luas daratan (Khansa, Widyastuti, Nugroho Adji, Naufal, Agus Riyanto, & Ramadhan, 2020). Kabupaten Banggai Kepulauan Provinsi Sulawesi Tengah memiliki luas kawasan karst sekitar 80% - 90% dari luas daratannya (BPEE KLHK, 2017). Akuifer karst menyediakan 25% kebutuhan air minum bagi penduduk dunia (Buckerfield, Quilliam, Waldron, Naylor, Li, & Oliver, 2019), dan menyediakan 73,6% kebutuhan air minum bagi penduduk Kabupaten Banggai Kepulauan (BPLH BangKep, 2013). Berdasarkan hasil pemantauan kualitas air pada mata air di Kabupaten Banggai Kepulauan telah tercemar oleh bakteri *E. coli* sedangkan untuk parameter fisik dan kimia belum menunjukkan cemaran pada mata air, hal ini disebabkan belum adanya aktivitas industri yang dapat mencemari mata air.

Kawasan karst memiliki sifat dan karakteristik kontaminasi yang berbeda, bahkan di area yang sama. Komposisi kontaminasi akan memiliki perubahan besar pada waktu yang berbeda. Beberapa penelitian karakteristik kontaminan air tanah di kawasan karst terhadap dampak penggunaan lahan dan perubahan tutupan lahan pada waktu yang berbeda telah dilakukan. Sebagian besar penelitian analisis kontaminan logam berat dan mikroba patogen menggunakan data gabungan antara hasil analisis kualitas air dan data penginderaan jauh untuk membandingkan hasil analisis kualitas air sebelum dan sesudah penggunaan lahan dan perubahan tutupan lahan (Zhao, Zeng, Liu, & Wang, 2010; Zoran Stevanović, 2015).

Pencemaran pada akuifer karst erat kaitannya dengan tingkat permeabilitas air, karena memiliki kemampuan mengisi ulang pada akuifer karst. Oleh karena itu, perpindahan bahan pencemar berupa logam berat seperti Merkuri (Hg), Arsen (As), Kadmium (Cd), Kromium (Cr) VI, dan Timbal (Pb), tinja manusia dan ternak dari area pemukiman dan penggembalaan serta penggunaan bahan kimia pada kegiatan pertanian dan perkebunan maka akuifer karst akan terkontaminasi oleh mikroba dan bahan kimia. Curah hujan secara berkala dapat menyebabkan pengisian ulang air yang cepat dan berdampak pada pembuangan dan pengangkutan logam berat dan mikroba ke mata air karst, sehingga sumber air tanah Karst sangat rentan terhadap kontaminasi logam berat dan mikroba patogen yang disebabkan oleh masuknya air hujan ke saluran karst yang sedikit filtrasi di dalam sistem hidrologinya (Epting, Page, Auckenthaler, & Huggenberger, 2018; M. I. Atta,

Zehra, Dai, Ali, Naveed, Ali, Sarwar, Ali, Iqbal, Bawazeer, Abdel-Hameed, & Ali, 2023).

Terdapat berbagai polutan organik dan anorganik dari berbagai sumber seperti udara, air, tanah dan bahan makanan yang memiliki risiko kesehatan pada manusia (Gunjyal, Rani, Asgari Lajayer, Senapathi, & Astatkie, 2023). Beberapa negara telah melakukan penelitian terkait logam berat yang berdampak pada kesehatan manusia bahkan berefek karsinogenik dan non-karsinogenik (Han, Zhou, Huang, Lu, Li, & Li, 2020; Boudebbouz, Boudalia, Bousbia, Habila, Boussadia, & Gueroui, 2021; Oliveira, Izquierdo, Querol, Lieberman, Saikia, & Silva, 2019; Pelfrêne, Sahmer, Waterlot, & Douay, 2019; Thongyuan, Khantamoon, Aendo, Binot, & Tulayakul, 2021). Selain itu, logam berat terdeteksi dalam susu sapi mentah dan mempengaruhi kesehatan manusia berdasarkan tingkat bahayanya (Boudebbouz, Boudalia, Bousbia, Habila, Boussadia, & Gueroui, 2021). Begitupun dengan kandungan mikrobiologi pada air minum yang dapat menimbulkan beberapa penyakit seperti kolera, demam tifoid, dan disentri basiler. Analisis mikrobiologi air terutama didasarkan pada konsep bakteri indikator tinja (Cabral, 2010). Bakteri utama yang ada dalam kotoran manusia dan hewan dan bakteri indikator tinja. Kelompok bakteri koliform telah lama digunakan sebagai organisme indikator kontaminasi mikroba pada air dan secara historis menyebabkan persepsi keamanan kesehatan masyarakat. Diantara bakteri *coliform*, *Escherichia coli* merupakan indikator kontaminasi tinja (Some, Mondal, Mitra, Jain, Verma, & Das, 2021).

Perencanaan pembangunan yang tidak tepat dengan memperluas pemanfaatan lahan untuk kegiatan pembangunan di atas kawasan karst dapat menyebabkan dampak dan bahaya bagi kuantitas dan kualitas air minum. Kegiatan industri, pertanian, pembuangan limbah, ternak dan permukiman dapat menginduksi pencemaran air tanah di kawasan karst melalui kontaminasi logam berat dan mikroba pada sumber air minum. Kontaminasi logam berat dan mikroba patogen yang tinggi berdasarkan hasil pengukuran kualitas air minum pada air tanah karst disebabkan oleh adanya limbah, kotoran, dan/atau kontaminan antropogenik (He, Qiu, Jiang, Wu, & Liu, 2016). Oleh karena itu, memahami dan mengelola pencemaran air oleh logam berat dan mikroba di lingkungan karst merupakan kunci untuk melindungi kesehatan masyarakat yang bergantung pada sumber air minum ini (L. Liu, 2021; M. I. Atta, Zehra, Dai, Ali, Naveed, Ali, Sarwar, Ali, Iqbal, Bawazeer, Abdel-Hameed, & Ali, 2023).

Kualitas air tanah di suatu wilayah sangat ditentukan oleh proses alami (litologi, kecepatan air tanah, kualitas air imbuhan, dan interaksi dengan jenis akuifer lainnya) dan kegiatan antropogenik (pertanian, industri, pembangunan perkotaan) dan peningkatan eksploitasi sumber daya air. Penggunaan lahan merupakan salah satu faktor terpenting yang menentukan kualitas air. Namun, sangat sedikit penelitian yang berfokus pada dampak penggunaan lahan dan

perubahan tutupan lahan pada sistem hidrogeokimia karst. Sebagai ekosistem yang sensitif, sistem dinamika karst dikendalikan oleh lingkungan karst. Sebagai faktor ekosistem karst yang rentan, sistem air tanah karst sangat sensitif terhadap penggunaan lahan dan perubahan tutupan lahan (Zhao, Zeng, Liu, & Wang, 2010; Zoran Stevanović, 2015).

Paparan logam berat dalam jangka panjang yang berpotensi menjadi racun dalam air telah menyebabkan kerusakan besar pada kesehatan manusia pada organ target seperti otak, hati, tulang, dan ginjal di mana logam berat tersebut terakumulasi. Penyakit ini telah mengganggu fungsi saraf pusat dan mental serta sel darah, ginjal, hati, paru-paru, dan organ vital lainnya. Ini berdampak buruk pada proses metabolisme tubuh pada konsentrasi di atas tingkat yang diizinkan WHO. Risiko nyata dari konsumsi dan kontak kulit menunjukkan bahwa konsumsi adalah cara yang paling umum, karena lebih banyak bayi yang diikuti oleh anak-anak yang lebih terkena dampaknya dibandingkan orang dewasa (Jabbo, Isa, Aris, Ramli, & Abubakar, 2022).

Penelitian tentang logam berat dan mikoba patogen pada mata air di kawasan karst khususnya di Kabupaten Banggai Kepulauan masih terbatas, dengan tidak adanya penelitian tentang risiko logam berat dan mikroba patogen dalam mata air terhadap kesehatan manusia. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menilai dampak paparan logam berat dan mikroba patogen pada mata air yang dikonsumsi oleh masyarakat adalah dengan menggunakan metode analisis risiko kesehatan lingkungan. Penelitian Widyastuti *et al* (2019) pada sungai bawah tanah Kawasan Karst Gunungsewu Kab. Gunung Kidul Daerah Istimewa Yogyakarta menunjukkan kelas kualitas air pada musim kemarau pada sungai-sungai alogenik meliputi kelas I sampai dengan kelas IV. Parameter yang menunjukkan adanya pencemaran yang berat meliputi BOD, Nitrit, Klorida, Tembaga dan Fecal *coliform*. Klasifikasi tingkat pencemaran berdasarkan pada Metode Storet di lokasi kajian terdiri atas klasifikasi cemar sedang pada dua sungai alogenik dan klasifikasi cemar berat pada tiga sungai alogenik.

Penelitian Malongi *et al* (2019) juga menemukan bahwa jumlah responden yang memiliki $RQ > 1$ lebih banyak (70 responden) bahkan lebih dari 50% disbanding responden dengan $RQ < 1$ (30 responden) (Mallongi, Novitasari, Noor, Fatmawati, Saleh, Sehalyana, Apollo, & Nur, 2020). Analisis terhadap air sumur dari 94 rumah tangga di distrik Cu Chi, Vietnam juga menemukan bahwa risiko lingkungan terkait kontaminasi logam berat tidak tinggi. Namun pada kedalaman tertentu, koefisien RQ untuk As umumnya tinggi yakni pada kedalaman 20 m dan 70 m ($RQ < 1$) (Nguyen, Nguyen, Dau, & Tran, 2020).

Berdasarkan hasil penelitian oleh Birawida *et al* (2018) menemukan bahwa di Pulau Bonetambung Kota Makassar diperoleh hasil dari 10 titik pengambilan sampel air sumur gali, hanya 1 titik yang memenuhi batas cemar bakteri koliform yaitu sebesar 4 MPN. Artinya, terdapat 4 koloni bakteri

koliform pada setiap 100 ml air sumur. Sedangkan 9 titik pengambilan sampel tidak memenuhi syarat. Hasilnya dengan menggunakan QMRA diperoleh hasil akhir bahwa 3 titik sampel pengambil air beresiko rendah, dan 7 diantaranya beresiko tinggi.

Penilaian risiko juga dapat mengevaluasi potensi atau risiko yang diwujudkan dampak strategi manajemen pada kesehatan masyarakat. Berdasarkan hasil karakteristik risiko maka dapat di rumuskan manajemen risiko sebagai langkah untuk meminimalisir kemungkinan risiko infeksi terjadinya suatu penyakit akibat adanya bakteri *Escherichia coli* (Ainun, 2022).

Escherichia coli sangat patogenik bagi manusia adanya cemaran ini dapat menimbulkan masalah kesehatan. Gejala klinis infeksi bervariasi mulai dari diare non-berdarah hingga diare berdarah, disebut kolitis hemoragik. Kolitis hemoragik adalah kondisi serius yang mengancam jiwa dan dapat menyebabkan sindrom uremik hemolitik, yang mengakibatkan kerusakan ginjal dan kemungkinan kematian. Infeksi *enterohemorrhagic E. coli* dapat menyebabkan kerusakan ginjal jangka panjang atau permanen dan kerusakan ginjal penyakit (Ainun 2022). Kerentanan air tanah terhadap pencemaran mengacu pada tingkat kepekaan air tanah terhadap masuknya unsur sumber pencemar (polutan) atau tingkat perubahan kondisi tatanan (kualitas) air tanah akibat aktivitas manusia maupun proses alami yang berpotensi menurunkan kualitas air hingga tidak sesuai dengan peruntukannya (Febriarta, Marfai, Wacano, Larasati, & Hizbaron, 2022).

Berdasarkan masalah di atas, maka peneliti bermaksud meneliti lebih dalam tentang risiko kesehatan manusia dalam mengonsumsi air minum yang tercemar logam berat dan mikroba patogen dengan metode pendekatan *Environmental Health Risk Assessment* (EHRA) dan metode *Quantitative Microbial Risk Assessment* (QMRA) yang selanjutnya disusun manajemen risiko pajanan logam berat dan mikrobiologi pada sumber air minum masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan. Judul penelitian ini adalah “Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Pencegahan Pencemaran pada Air Minum Masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka yang menjadi rumusan masalah adalah sebagai berikut:

- 1.2.1 Bagaimana Kondisi Lingkungan (geologi, hidrologi dan tutupan lahan) pada sumber air minum masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan?
- 1.2.2 Bagaimanakah tingkat risiko kesehatan masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan yang mengonsumsi air minum mengandung logam berat Merkuri (Hg), Arsen (As), Kadmium (Cd), Kromium (Cr) VI, dan Timbal (Pb)?

- 1.2.3 Bagaimanakah tingkat risiko kesehatan masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan yang mengkonsumsi air minum mengandung mikrobiologi?
- 1.2.4 Bagaimana manajemen risiko paparan logam berat dan mikrobiologi pada sumber air minum masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan?

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini terbagi menjadi tujuan umum dan tujuan khusus yang akan diuraikan sebagai berikut ini:

1.3.1. Tujuan Umum

Tujuan umum penelitian ini adalah mengidentifikasi kondisi lingkungan (geologi, hidrologi dan tutupan lahan) sekitar mata air, analisis risiko serta merumuskan manajemen risiko kesehatan lingkungan pada air minum masyarakat yang mengandung logam berat dan mikrobiologi.

1.3.2. Tujuan Khusus

Tujuan khusus penelitian ini diuraikan sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi kondisi lingkungan (geologi, hidrologi dan tutupan lahan) pada sumber air minum masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan;
2. Menganalisis risiko kesehatan lingkungan dari Merkuri (Hg), Arsen (As), Kadmium (Cd), Kromium (Cr) VI, dan Timbal (Pb) pada air minum masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan;
3. Menganalisis risiko mikrobiologi pada air minum masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan;
4. Merumuskan manajemen risiko akibat paparan logam berat dan mikrobiologi pada air minum masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan.

1.4. Kegunaan Penelitian

1.4.1. Kegunaan Teoritik

1. Penelitian ini diharapkan dapat melengkapi pemahaman masyarakat dan Pemerintah Daerah secara komprehensif tentang upaya pengelolaan risiko paparan logam berat dan mikrobiologi pada air minum masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan.
2. Penelitian ini diharapkan dapat memperkaya wawasan dan akan menemukan nilai-nilai ilmiah baru dalam upaya pengelolaan risiko paparan logam berat dan mikrobiologi pada air minum masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan.
3. Penelitian ini dapat dijadikan acuan atau pedoman bagi masyarakat dan Pemerintah Daerah dalam masalah kesehatan lingkungan sebagai

upaya pengelolaan risiko paparan logam berat dan mikrobiologi pada air minum masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan.

1.4.2. Kegunaan Aplikatif

1. Meningkatkan pengetahuan masyarakat dan Pemerintah Daerah dalam mengendalikan dan mengatasi masalah pencemaran pada air minum masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan.
2. Memberdayakan masyarakat dalam membantu mengawasi kondisi mata air karst sebagai sumber air minum masyarakat berdasarkan kondisi penggunaan lahan dan tutupan lahan.
3. Mengendalikan perilaku masyarakat dan kebijakan Pemerintah Daerah dalam perlindungan daerah tangkapan air di mata air Karst Banggai Kepulauan sebagai sumber air minum masyarakat.

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 Assessment (QMRA)* dengan tujuan untuk menilai atau memprakirakan besaran risiko kesehatan manusia yang disebabkan oleh paparan bahaya lingkungan.

Analisis ini digunakan dengan tujuan untuk menganalisis bukti ilmiah tentang risiko kesehatan lingkungan dalam upaya pencegahan pencemaran pada air minum masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan serta faktor-faktor penyebab pencemaran dan manajemen risiko paparan logam berat dan mikrobiologi pada air minum masyarakat di Kawasan Karst Banggai Kepulauan. Dengan menggunakan analisis ini, diharapkan data yang diperoleh akan lebih lengkap dan akurat.

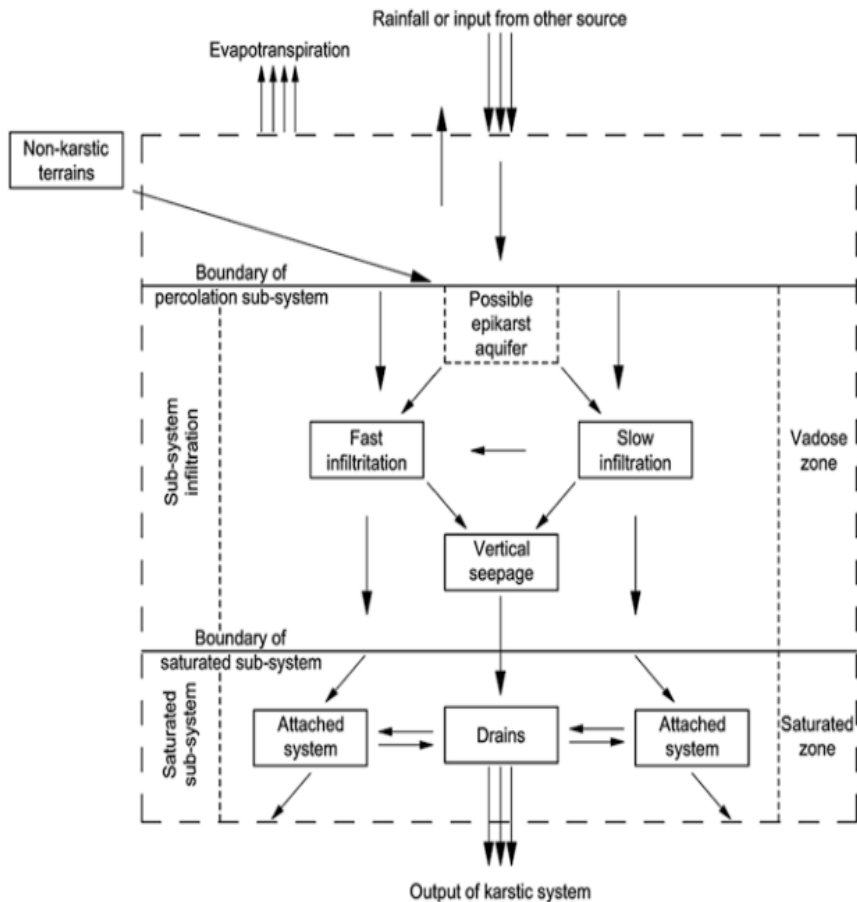
1.6. Kebaruan Penelitian

Penelitian ini memiliki nilai kebaruan berupa pendekatan baru dalam analisis risiko kesehatan lingkungan di Kawasan Karst Banggai Kepulauan dengan menggabungkan analisis risiko kimia dan risiko mikrobial berdasarkan faktor-faktor geologi, hidrologi tutupan lahan dan aktivitas manusia yang akan berdampak bagi kesehatan manusia di kawasan karst.

1.7 Desain Konseptual

1.7.1 Kerangka Teori Penelitian

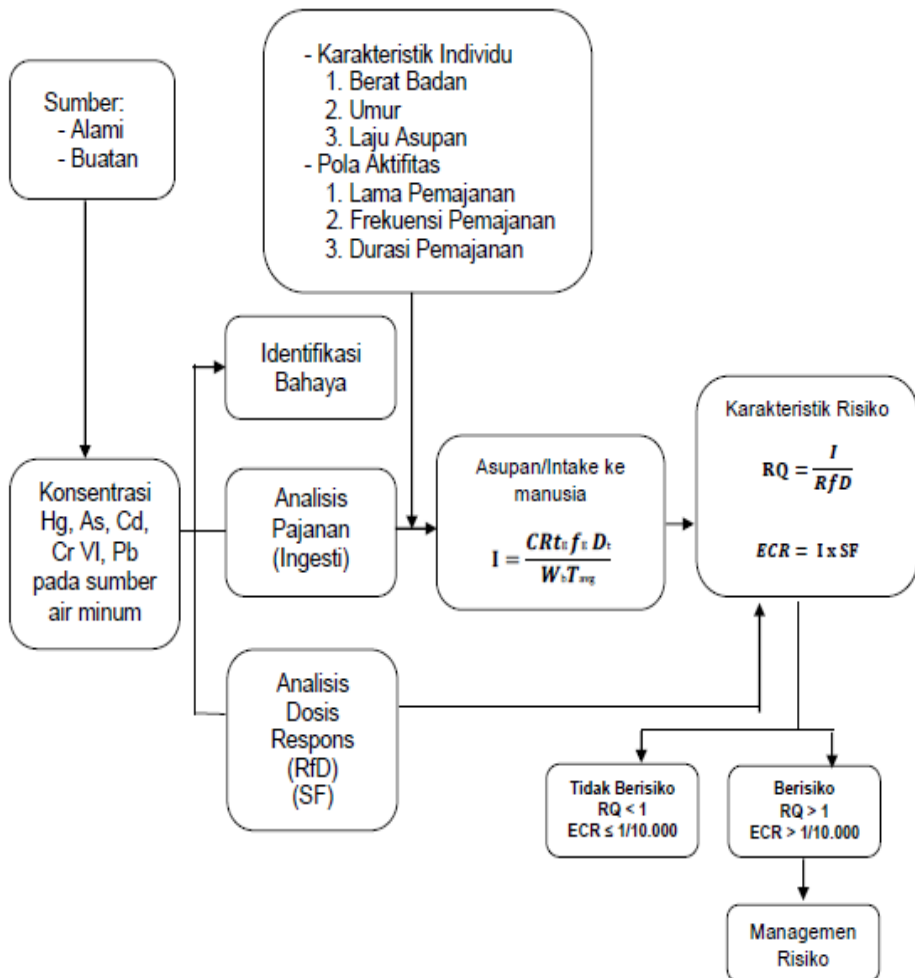
Kerangka Teori dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.



Teori ini mengemukakan tentang adanya dua jenis aliran melalui zona *vadose* atau zona tak jenuh. Menunjukkan perkolasi air hujan yang terinfiltrasi atau air yang diserap melalui pori-pori tanah, bergerak secara vertikal maupun horizontal menuju muka air tanah baik secara lambat atau cepat tergantung pada sifat akuifer yaitu difus dan terkonsentrasi mengalir.

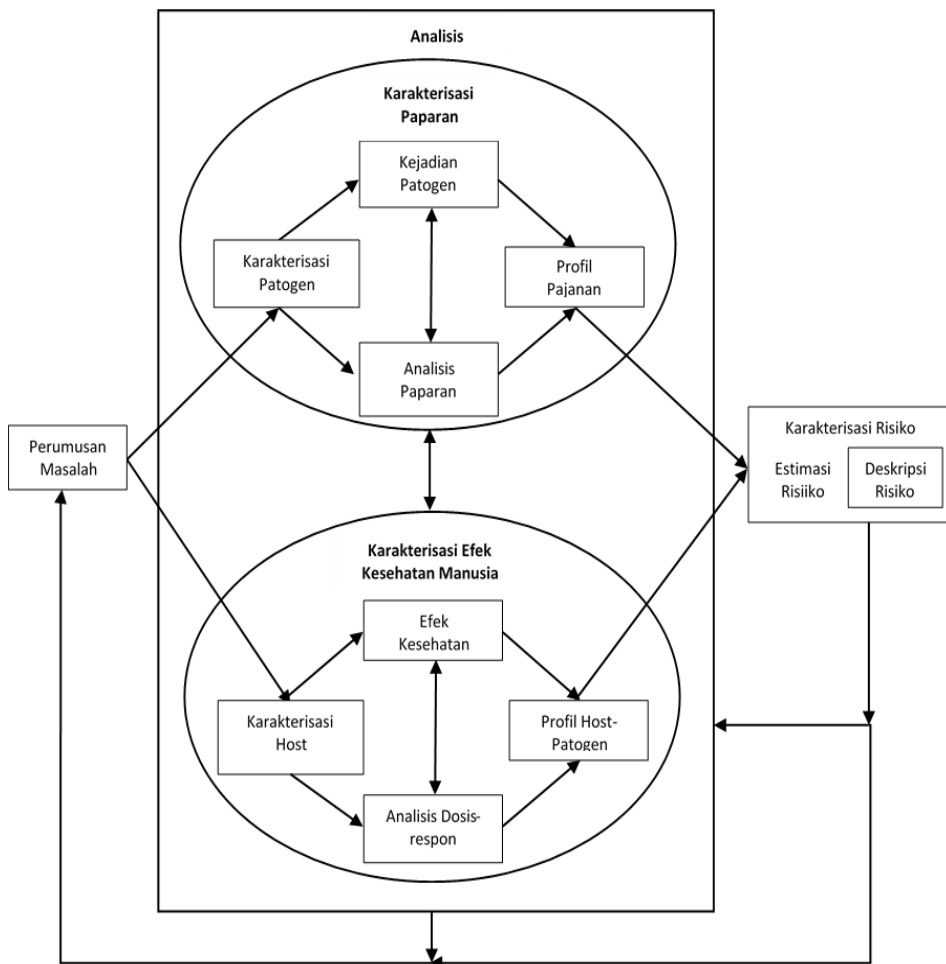
Gambar 1. Skema fungsi akuifer karst.

Sumber: (Mangin 1975 dalam Zoran Stevanović, 2015)



Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan merupakan metode yang digunakan untuk menghitung perkiraan risiko yang disebabkan oleh paparan agen baik kimia maupun fisik pada kelompok berisiko dengan mempertimbangkan karakteristik risiko serta menyusun skenario pengelolannya atau manajemen risiko.

Gambar 2. Kerangka Teori Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan Logam Berat (Sumber: Dirjen P2PL, 2012)

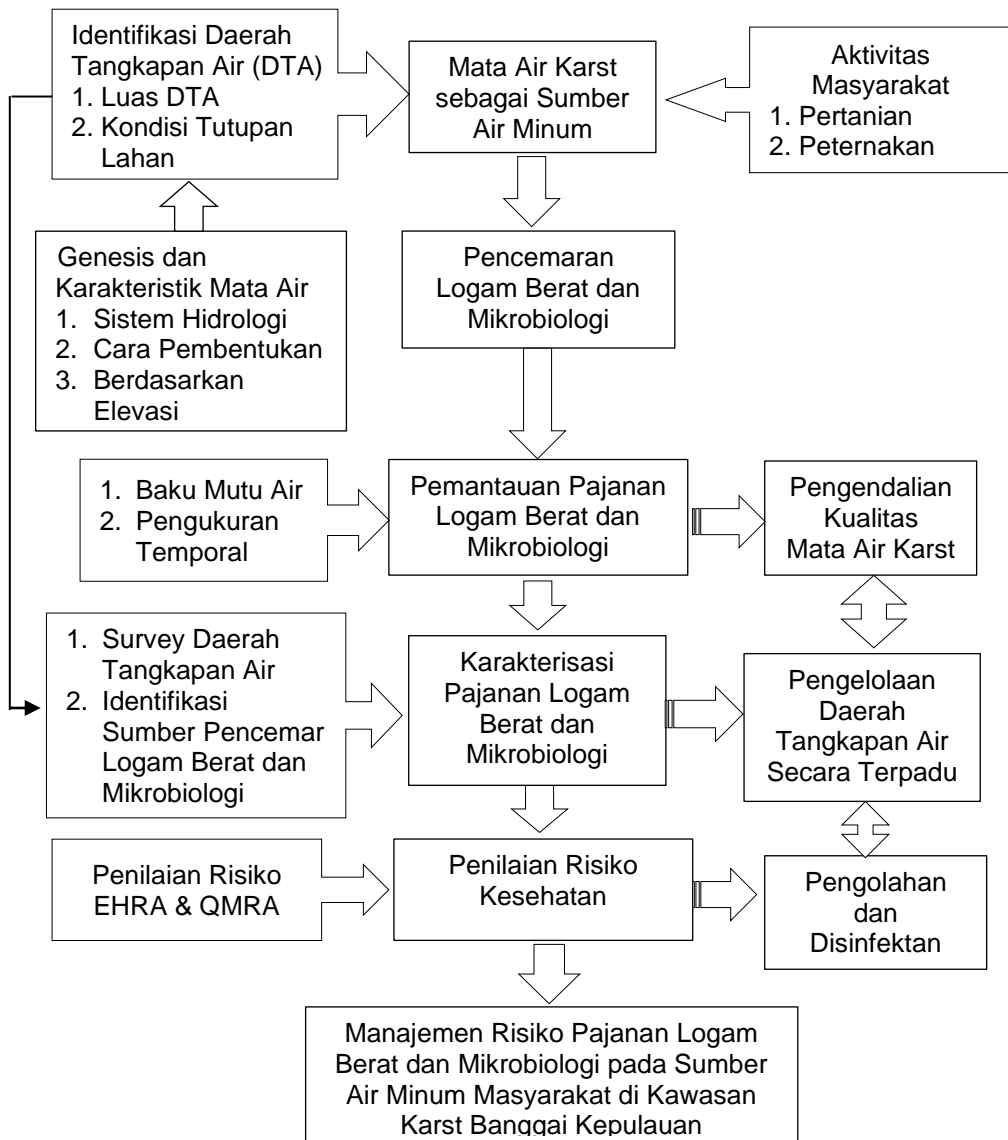


Teori: Komponen penilaian risiko mikroba disadur dari International Life Sciences Institute (2000); modifikasi dari Mark Robson dan William Toscano (2007).

Gambar 3. Kerangka Teori Analisis Risiko Kesehatan Lingkungan Paparan Mikroba (Sumber: ILSI, 2000; Mark Robson, 2007)

1.7.2 Kerangka Konsep Penelitian

Kerangka konsep penelitian dalam penelitian ini adalah sebagai berikut.



Gambar 4. Kerangka Konsep Penelitian

BAB II TOPIK PENELITIAN I

Kondisi Lingkungan Daerah Tangkapan Air Kawasan Karst Banggai Kepulauan

2.1 Abstrak

Karst merupakan topografi unik yang terbentuk akibat adanya aliran air pada bebatuan karbonat (biasanya berupa kapur, dolomit atau marmer). Kawasan Karst Banggai Kepulauan Provinsi Sulawesi Tengah didominasi oleh kenampakan Ekosistem Karst yang mencakup 97% dari total wilayah. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui kondisi lingkungan (geologi, hidrologi dan tutupan lahan) serta aktivitas masyarakat di daerah tangkapan air Kabupaten banggai Kepulauan. Jenis penelitian ini adalah penelitian observasional dengan menggunakan metode analisis spasial. Hasil penelitian menunjukkan secara geologi dan hidrologi, singkapan batugamping di Pulau Peling mencapai hampir 80-90% dari seluruh luas wilayah Kabupaten Banggai Kepulauan, yang menyebabkan sebagian besar wilayah kajian memiliki karakteristik hidrologi karst yang dicirikan oleh sistem hidrologi utama berupa akuifer percelahan (*diffuse*) dan lorong gua (*conduit*) yang membentuk sistem aliran sungai bawah tanah (*underground rivers*). Tutupan dan penggunaan lahan daerah tangkapan air (DTA) mata air berada di sekitar tataguna lahan hutan sekunder, kebun campuran, semak belukar dan pemukiman. Aktivitas masyarakat sehari-hari di sekitar daerah tangkapan air (DTA) mata air adalah pertanian, perkebunan, peternakan, dan aktivitas domestik lainnya.

2.2 Pendahuluan

Karst merupakan topografi unik yang terbentuk akibat adanya aliran air pada bebatuan karbonat (biasanya berupa kapur, dolomit atau marmer). Proses geologi ini, terjadi selama ribuan tahun, menghasilkan permukaan yang berlubang-lubang vertikal, sungaisungai, dan mata air bawah tanah hingga gua dan sistem drainase bawah tanah yang kompleks (Susilawati, 2018).

Istilah karst berasal dari bahasa Jerman dan merupakan turunan dari bahasa Slovenia yang mempunyai arti lahan gersang berbatu. Seperti halnya pegunungan yang ada di dunia. Ada banyak manfaat dari kawasan karst. Pertama sebagai gudang penyimpanan sumber daya alam yang melimpah. Kedua, keberadaan karst mampu menyimpan air dalam jumlah besar sekaligus menjadi rumah bagi ribuan spesies flora dan fauna (Susilawati, 2018).

Luas kawasan karst di dunia diperkirakan antara 7% - 10% dari luas permukaan bumi, di Indonesia kawasan karst mencakup sekitar 20% dari total luas daratan (Khansa, Widyastuti, Nugroho Adji, Naufal, Agus Riyanto, & Ramadhan, 2020). Kawasan karst di Indonesia memiliki luas sekitar 15,4 juta hektare dan tersebar hampir di seluruh Indonesia. Dengan luas tersebut, Indonesia dinobatkan sebagai salah satu negara dengan kawasan karst terluas di asia tenggara.

Kabupaten Banggai Kepulauan Provinsi Sulawesi Tengah memiliki luas kawasan karst sekitar 80% - 90% dari luas daratannya (BPEE KLHK, 2017). Akuifer karst menyediakan 25% kebutuhan air minum bagi penduduk dunia (Buckerfield, Quilliam, Waldron, Naylor, Li, & Oliver, 2019), dan menyediakan 73,6% kebutuhan air minum bagi penduduk Kabupaten Banggai Kepulauan (BPLH BangKep, 2013).

Kawasan karst merupakan suatu kompleks fenomena geologi yang memiliki kondisi hidrologi yang unik dan spesifik. Disebut unik karena karst merupakan daerah yang umumnya memiliki morfologi dengan sistem jaringan rongga atau celah yang ditunjukkan oleh banyaknya mata air dan sungai bawah tanah, sedangkan disebut spesifik karena tersusun atas batuan yang bersifat mudah larut seperti batugamping, dolomit, gipsum, dan batuan yang mudah larut lainnya. Secara geologi, lahan karst hanya dapat dibentuk oleh batuan yang mudah bereaksi dan larut dalam air, terlebih apabila air itu bersifat asam. Batuan semacam ini pada umumnya mengandung senyawa karbonat (CO₃) lebih dari 50% dari total mineral yang ada pada batuan tersebut (Endah *et al*, 2017).

2.3 Metode Penelitian

2.3.1 Jenis Penelitian

Jenis penelitian ini adalah penelitian observasional analitik dengan rancangan *Cross Sectional* yaitu penelitian dengan cara observasi atau pengumpulan data pada waktu yang bersamaan (*point time approach*) (Stang, 2014).

2.3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini di laksanakan pada bulan April – Juli 2023 di Kabupaten Banggai Kepulauan Provinsi Sulawesi Tengah. Lokasi penelitian ini pada 4 mata air yaitu Paisu Lalomo Kec. Buko Selatan, Paisu Olulan Kec. Bulagi Utara, Paisu Taabak Kec. Liang dan Paisu Sinangkal Kec. Tinangkung Utara Kabupaten Banggai kepulauan. Lokasi ini dijadikan tempat penelitian karena merupakan sumber air minum masyarakat di 6 Kecamatan yaitu Kec. Buko Selatan, Kec. Bulagi Selatan, Kec. Bulagi, Kec. Bulagi Utara, Kec. Liang dan Kec. Tinangkung Utara kawasan dari 12 Kecamatan di Kabupaten Banggai Kepulauan. Lokasi penelitian dapat dilihat pada Tabel 1 berikut ini.

Tabel 1. Lokasi Penelitian di Kabupaten Banggai Kepulauan

No	Nama Mata Air	Lokasi Mata Air (Kecamatan)	Debit (Liter/Detik)	Pemanfaatan
1	Paisu Sinangkal	Tinangkung Utara	> 450,0	PDAM Masyarakat Ibukota Kabupaten
2	Paisu Olulan	Bulagi Utara	Menggenang	Domestik dan PDAM
3	Paisu Lalomo	Buko Selatan	> 15.000,0	Domestik dan Rencana Distribusi 3 Kecamatan
4	Paisu Taabak	Liang	350,0	Domestik dan PDAM

Sumber: (BPLH BangKep, 2013)

2.3.3 Populasi dan Sampel

2.3.3.1 Populasi

1. Populasi Manusia

Populasi manusia dalam penelitian ini adalah seluruh masyarakat yang mengonsumsi air minum dari 4 mata air di Kawasan Karst Banggai Kepulauan meliputi Kecamatan Tinangkung, Buko Selatan, Bulagi, Bulagi Selatan, Bulagi Utara dan Liang yaitu 9171 Jiwa (BPLH BangKep, 2013; BPS BangKep, 2022).

2. Populasi Lingkungan

Populasi lingkungan dalam penelitian ini adalah air baku untuk keperluan air minum masyarakat yang berasal dari 39 mata air potensial yang tersebar diseluruh wilayah Kabupaten Banggai Kepulauan seperti dapat dilihat pada Tabel 2 berikut ini.

Tabel 2. Nama, Lokasi, Debit dan Pemanfaatan Mata Air di Kawasan Karst Banggai Kepulauan

No	Nama Mata Air	Lokasi Mata Air (Kecamatan)	Debit (Liter/Detik)	Pemanfaatan
1	Alakasing	Peling Tengah	8,0	Domestik
2	Paisu Telea	Peling Tengah	2.465,0	Domestik
3	Paisu Patukuki	Peling Tengah	3.714,6	Domestik
4	Balombong	Peling Tengah	10,0	Domestik
5	Labibi 1	Peling Tengah	105,8	Domestik
6	Labibi 2	Peling Tengah	150,4	Domestik
7	Bangunemo	Bulagi Utara	Menggenang	Domestik dan PDAM
8	Lukpanenteng	Bulagi Utara	Menggenang	Domestik/Wisata
9	Matanyo	Buko	182,4	Domestik
10	Batu Gong	Buko	< 50,0	Domestik
11	Paisu Lelengan	Buko	3.703,7	Belum dimanfaatkan
12	Batangono 1	Buko	60,0	Tidak digunakan sejak terdapat PDAM
13	Batangono 2	Buko	663,7	Domestik
14	Paisu Batu 1	Buko	150,0	Domestik
15	Paisu Batu 2	Buko	800,0	Domestik dan Mikrohidro (Listrik)
16	Leling Lumbi-lumbia	Buko Selatan	> 100,0	Domestik dan PDAM
17	Slobar Lumbi-lumbia	Buko Selatan	750,0	Domestik/Payau
18	Danau Alani	Buko Selatan	> 5.000,0	PLTMH
19	Air Terjun Kambani	Buko Selatan	1.186,0	Domestik/Wisata

No	Nama Mata Air	Lokasi Mata Air (Kecamatan)	Debit (Liter/Detik)	Pemanfaatan
20	Lemelu	Buko Selatan	> 15.000,0	Domestik dan Rencana Distribusi 3 Kecamatan
21	Sabelak	Bulagi Selatan	Menggenang	Domestik
22	Lolantang,	Bulagi Selatan	Menggenang	Domestik
23	Kuala Indah Lalanday	Bulagi	5.888,0	Domestik
24	Mamulusan,	Liang	493,4	Domestik
25	Okumel 1	Liang	400,0	Domestik
26	Okumel 2	Liang	500,0	Domestik
27	Okumel 3	Liang	5.608,6	Domestik
28	Okumel 4	Liang	2.444,4	Belum dimanfaatkan (masuk ke laut)
29	Loolong	Liang	> 2.000,0	Domestik
30	Paisu Mandoni	Liang	114,1	PDAM
31	Seleati	Liang	350,0	Domestik/PDAM
32	Paisu Mosoni	Tinangkung Selatan	2.034,0	Domestik
33	Pelong, Tonuson	Totikum Selatan	PDAM	PDAM
34	Danau Tendetung	Totikum Selatan	4.800,0	Belum dimanfaatkan
35	Kambutokan	Totikum	50,0	Domestik
36	Luksagu	Tinangkung Utara	1.860,4	Belum dimanfaatkan
37	Paisu Sinangkal 1	Tinangkung Utara	> 450,0	PDAM
38	Paisu Sinangkal 2	Tinangkung Utara	10,0	PDAM
39	Kautu	Tinangkung	134,4	Domestik

Sumber: (BPLH BangKep, 2013)

2.3.3.2 Sampel

Sampel Lingkungan

Sampel air yang diambil pada penelitian ini yaitu sebanyak 4 mata air di Kawasan Karst Banggai Kepulauan berdasarkan pemanfaatan air minum bagi masyarakat di 6 (enam) Kecamatan dari 12 (duabelas) Kecamatan di Kabupaten Banggai Kepulauan.

2.3.4. Pengumpulan Data

Pengumpulan data untuk penelitian kondisi lingkungan sekitar mata air seperti kondisi geologi, hidrologi, kondisi tutupan lahan di daerah tangkapan air dan aktivitas masyarakat di sekitar mata air. Selanjutnya mengumpulkan data sekunder berupa Peta Administrasi lokasi penelitian, Peta Geologi dan Peta Tutupan Lahan diperoleh dari data Kantor Desa, Kantor Kecamatan dan

instansi terkait di Kabupaten Banggai Kepulauan, mengenai jumlah dan karakteristik masyarakat, distribusi air minum masyarakat yang bersumber dari mata air, data penyakit tertinggi di wilayah studi, serta melalui buku-buku, literatur, hasil penelitian dan bacaan yang berkaitan dengan tema penelitian ini.

2.3.5. Tahapan Pelaksanaan Penelitian

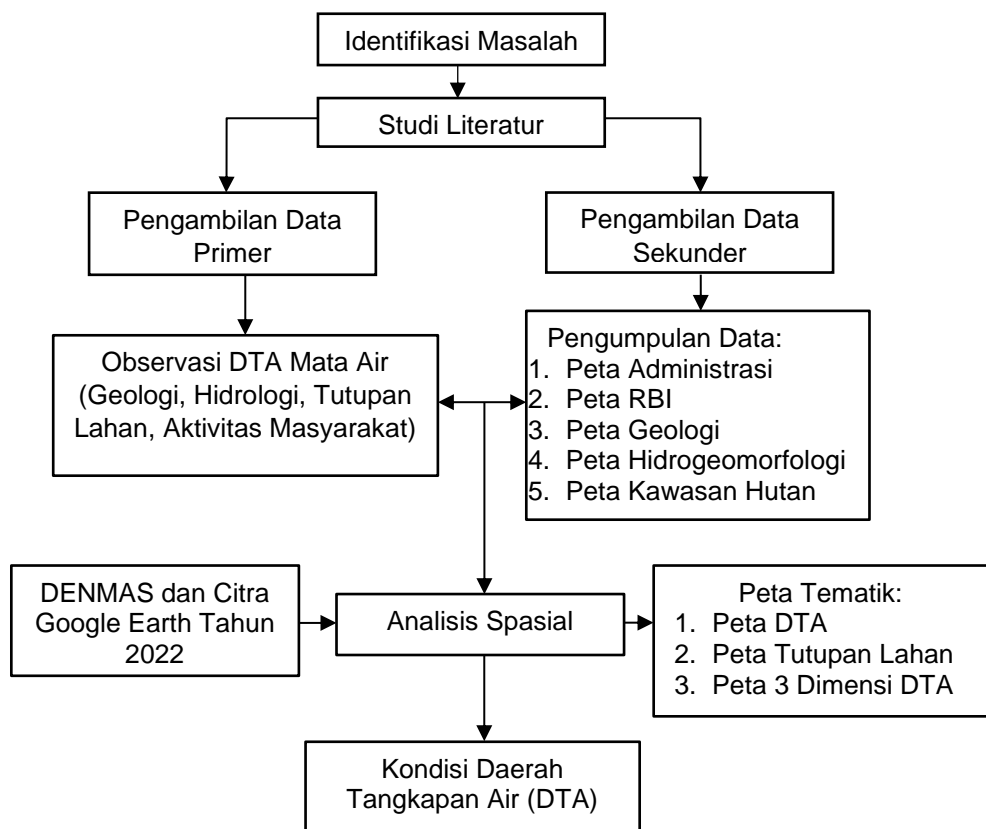
Penelitian ini melakukan observasi kondisi lingkungan mata air dengan melakukan pengamatan daerah imbuhan atau tangkapan mata air, serta tutupan dan penggunaan lahan yang selanjutnya disajikan dalam bentuk peta-peta tematik geologi, hidrogeologi, penggunaan lahan, dan daerah tangkapan air (DTA). Potensi dan karakteristik mata air, meliputi: persebaran dan tipe genesis mata air, debit dan sifat aliran. Kondisi daerah tangkapan air, meliputi: batas dan luas daerah tangkapan air, kondisi hutan sebagai tutupan lahan alami, dan pola pemanfaatan lahan. Bentuk pemanfaatan mata air (khususnya sebagai sumber air bersih) dan cakupan daerah yang memanfaatkannya. Faktor alam maupun aktivitas penduduk yang dapat mengancam ketersediaan daerah tangkapan dan potensi mata air.

2.3.6 Analisis Data

Analisis yang digunakan dalam penelitian ini adalah analisis spasial yaitu proses pengkajian dan pemahaman hubungan spasial antara objek atau fenomena di dalam suatu wilayah geografis. Dalam konteks analisis spasial, "spasial" merujuk pada ruang atau lokasi geografis, dan metode analisis ini membantu mengungkap pola, tren, atau hubungan yang berkaitan dengan distribusi geografis suatu fenomena (Pommerening, 2016). Pada penelitian ini data-data yang dibutuhkan adalah Peta Administrasi dan Peta Rupa Bumi Indonesia, Peta Tematik seperti Peta Geologi, Peta Ketinggian, Peta Hidrogeomorfologi, Peta Tutupan Lahan, dan Peta Kawasan Hutan serta interpretasi citra penginderaan jauh berupa Citra Google Earth Tahun 2022 untuk mendigitasi penutupan lahan di daerah tangkapan air (DTA) mata air. Sedangkan untuk pemodelan spasial daerah tangkapan air menggunakan metode *Watershed Delineation* dengan memperhatikan kelereng. Pemodelan titik tinggi ini menggunakan data DENMAS dan Citra Google Earth.

2.3.7 Alur Penelitian

Alur penelitian pada topik penelitian I ini diuraikan sebagai berikut ini.



Gambar 5. Alur Penelitian Topik Penelitian I

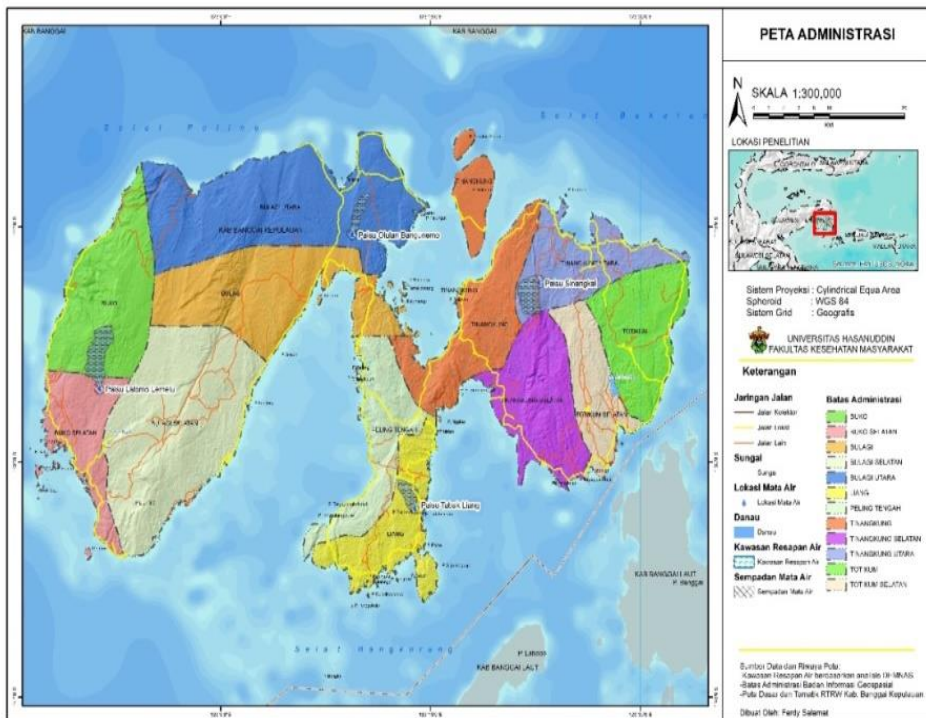
2.4 Hasil dan Pembahasan

2.4.1 Hasil Penelitian

2.4.1.1 Gambaran Umum Lokasi Penelitian

Kabupaten Banggai Kepulauan merupakan wilayah kabupaten dengan bentuk kepulauan di Provinsi Sulawesi Tengah. Secara geologi, wilayah Kabupaten Banggai Kepulauan merupakan bagian dari Mandala Banggai-Sula yang merupakan fragmen-fragmen benua yang berasal dari bagian utara lempeng benua Australia yang kemungkinan terpisah dari lempeng benua Australia pada periode Jura. Fragmen benua ini dicirikan dengan kompleks batuan dasar batuan metamorf Karbon dan batuan *plutonik Perm-Trias*. Berdasarkan teori tersebut, tidak dapat dipungkiri mendukung terbentuknya kondisi wilayah Kabupaten Banggai Kepulauan yang didominasi oleh

kenampakan Ekosistem Karst yang mencakup 97% dari total wilayah Kabupaten Banggai Kepulauan (BPLH BangKep, 2013b; BPEE KLHK, 2017).



Gambar 6. Peta Administrasi Kabupaten Banggai dan Kepulauan

Kabupaten Banggai Kepulauan secara administrasi (Gambar 6) terdiri dari 12 Kecamatan dan 144 Desa/Kelurahan yang memiliki luas wilayah daratan 2.448,79 Km² (26,85%), luas perairan laut 6.671,32 Km² (73,15%), panjang garis pantai 1.714,22 Km, dan jumlah pulau 293 pulau. Kabupaten Banggai Kepulauan masuk dalam klasifikasi pola hujan lokal. Pola hujan lokal dicirikan puncak hujan satu kali dalam setahun, di mana puncak hujan terjadi pada Bulan Juni, Juli dan atau Agustus. Curah hujan rerata bulanan di Kabupaten Banggai Kepulauan berkisar antara 34 mm/bulan sampai dengan 223 mm/bulan, dengan bulan paling kering terjadi pada bulan Oktober, sedangkan bulan paling basah pada bulan Juli. Berdasarkan rerata curah hujan bulanan, Kabupaten Banggai Kepulauan hanya memiliki dua bulan kering (kurang dari 60 mm/bulan) selama satu tahun, yakni pada bulan Oktober dan November (BPS BangKep, 2022).

Penduduk Kabupaten Banggai Kepulauan berdasarkan data BPS Tahun 2022 adalah 121.684 jiwa. Mayoritas penduduk Kabupaten Banggai Kepulauan bekerja pada sektor primer yaitu; pertanian, perkebunan, kehutanan dan perikanan yang menyumbang 60% dari keseluruhan kegiatan ekonomi yang ada di Kabupaten Banggai Kepulauan. Jika dilihat dari persentase tutupan

lahan yang ada di Kabupaten Banggai Kepulauan maka semak belukar merupakan tutupan lahan yang paling mendominasi yaitu sebesar 32% dari total wilayah Kabupaten Banggai Kepulauan. Selanjutnya tutupan lahan pertanian lahan kering dengan campuran semak belukar ataupun kebun campur sebanyak 31% dan hutan lahan kering sebesar 25%.

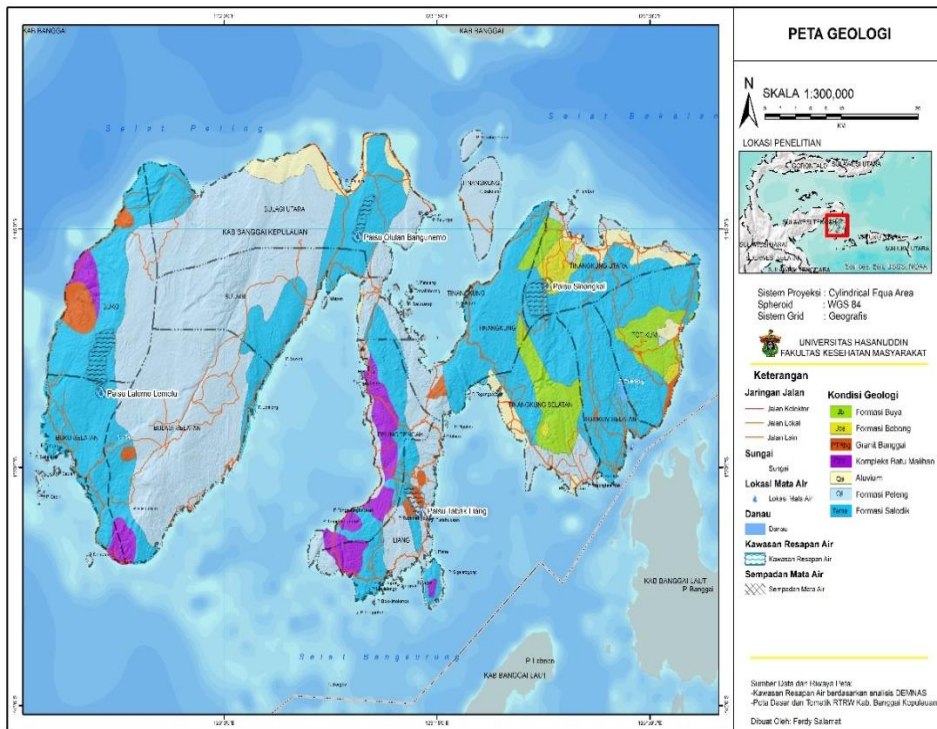
Sumber utama air bersih dan air minum bagi penduduk di Kabupaten Banggai Kepulauan pada umumnya masih mengandalkan sumber mataair, yaitu sebanyak 90 desa menggunakan mataair, 17 desa menggunakan air PDAM (yang juga bersumber dari mataair), 16 desa menggunakan sumur gali (airtanah), 18 desa memanfaatkan air hujan, dan 3 desa menggunakan sumber air bersih dari air permukaan (sungai atau danau).

2.4.1.2 Kondisi Lingkungan Daerah Tangkapan Air

Kawasan Karst di Kabupaten Banggai Kepulauan berkembang pada dua formasi batugamping, yaitu: batugamping berlapis dari Formasi Salodik (berumur Eosen – Miosen) dan batugamping terumbu dari Formasi Peleng (berumur kuartar). Penyebaran kedua jenis batugamping tersebut menempati area yang sangat luas, yaitu 85% dari wilayah Kabupaten Banggai Kepulauan.

Secara stratigrafis, batugamping terumbu menumpang secara tidak selaras di atas batugamping berlapis. Batugamping terumbu dominan berada di bagian tengah wilayah Kab. Bangkep. Batugamping berlapis dominan berada di bagian timur dan barat dari wilayah Kab. Bangkep dengan arah penyebaran utara-selatan. Selain itu, batugamping berlapis sebagian kecil juga tersebar pada bagian tengah Kab. Bangkep. Ketebalan kedua jenis batugamping mencapai >1200 meter dengan batuan yang terekspose memiliki elevasi hingga 99 mdpl. Kedua jenis batugamping menumpang di atas batuan yang kedap berupa granit, batu lempung, batu serpih, dan batuan malihan seperti pada Gambar 7.

Kondisi klimatologi yang mempengaruhi potensi mata air adalah curah hujan sebagai input mata air. Berdasarkan data curah hujan dari Stasiun Meteorologi Syukuran Aminudin Amir (Bubung) Luwuk Banggai, rata-rata curah hujan Tahun 2022 berkisar antara 35,6 mm (Desember) dan 330,4 mm (Juli). Sedangkan jumlah hari hujan berkisar antara 7 hari (Februari) dan 20 hari (Juli). Secara umum, curah hujan di Kab. Banggai Kepulauan merupakan pola lokal, dengan pola cembung, unimodal, dan puncak hujan terjadi pada bulan Juni hingga Juli.



Gambar 7. Peta Geologi Kabupaten Banggai Kepulauan

Bedasarkan cara pembentukannya 4 mata air pada penelitian ini dapat dikategorikan menjadi 3 (tiga) tipe, yaitu: mata air bertipe Lorong (*Conduit*) mata air percelahan/topografi, dan mata air doline dapat dilihat pada Tabel 3 sebagai berikut:

Tabel 3. Karakteristik, Elevasi dan Formasi Batuan Mata Air di Lokasi Penelitian

No	Nama Mata Air	Lokasi	Karakteristik Mata Air	Elevasi mdpl	Formasi Batuan
1	Paisu Lalomo	Kec. Buko Selatan	Mata air Kontak dan Sesar	557	Salodik
2	Paisu Olulan	Kec. Bulagi Utara	Mata air <i>Doline</i>	167,35	Salodik
3	Paisu Taabak	Kec. Liang	Mata air Percelahan/Topografi	166,66	Peling
4	Paisu Sinangkal	Kec. Tinangkung Utara	Mata air Percelahan/Topografi	212,02	Salodik

Sumber: Data Primer, 2023

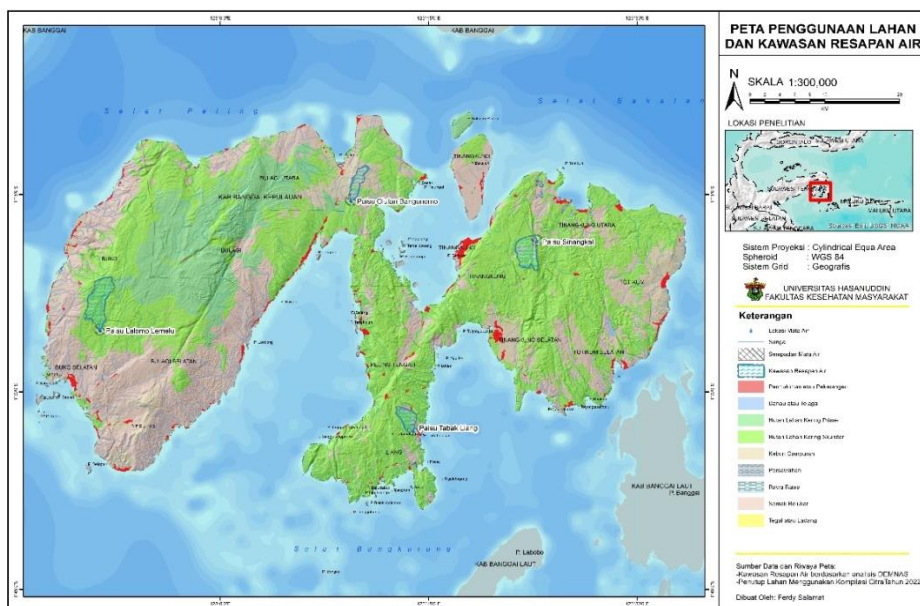
Tutupan dan penggunaan lahan pada setiap mata air berdasarkan hasil obeservasi lapangan dan analisis spasial menggunakan i(DENMAS) dari Badan

Informasi Geospasial (BIG) untuk pemodelan titik tinggi batas daerah tangkapan air hujan dan analisis Citra Google Earth Tahun 2022 untuk digitasi penutupan lahan maka diperoleh luas DTA dan penutupan lahan yang dapat dilihat pada Tabel 4 dan Gambar 8 sebagai berikut.

Tabel 4. Debit, Luas Daerah Tangkapan Air (DTA) Mata Air dan Tutupan/Penggunaan Lahan

No	Mata Air	Debit (Lt/dt)	Luas DTA (Ha)	Persentasi (%)	Tutupan /Penggunaan Lahan
1	Paisu Lalomo	>15.000	1523,27	99,87	Hutan Sekunder Pemukiman
			1,84	0,12	
			1525,12		
2	Paisu Olulan	Mengenang	39,38	7,29	Hutan Sekunder Kebun Campuran Semak Belukar
			484,67	89,76	
			15,86	2,93	
Total			539,92		
3	Paisu Taabak	350	454,23	76,14	Hutan Sekunder Kebun Campur Semak Belukar
			24,19	4,05	
			118,09	19,79	
Total			596,52		
4	Paisu Sinangkal	450	865,90	83,13	Hutan Sekunder Kebun Campur Semak Belukar Pemukiman
			89,35	8,29	
			86,75	8,05	
			5,55	0,51	
Total			1077,27		

Sumber: Data Primer, 2023



Gambar 8. Peta Tutupan Lahan Dan Daerah Tangkapan Air

1. Mata Air Paisu Lalomo

Mata air Paisu Lalomo terletak di Desa Lumbi-lumbia Kec. Buko Selatan, berdasarkan sistem hidrologinya merupakan mata air sistem lorong (*Conduit*) yang keluar dari sistem perguaan. Mata air tipe ini memiliki debit yang sangat besar, besarnya debit aliran mata air tipe ini disebabkan karena sistem perguaan menjadi konsentrasi aliran airtanah yang diimbuh oleh suatu jaringan perguaan, yang dikontrol oleh keterdapatan zona sesar dan kekar.

Berdasarkan cara pembentukannya mata air Paisu Lalomo adalah mata air percelahan yang berada pada batugamping napalan Formasi Salodik yang terpotong sesar atau patahan membentuk topografi lereng curam atau terjal. Bahwa zona sesar merupakan konsentrasi aliran airtanah terdapat sistem perguaan yang membentuk sungai bawah tanah. Pemunculan mata air tipe ini terjadi bukan karena kontak perlapisan batuan, tetapi akibat airtanah yang mengalir melalui percelahan batugamping atau sistem sungai bawah tanah yang terpotong oleh zona sesar.

Berdasarkan elevasi atau ketinggian lokasi pemunculan mata air dianggap penting, karena mata air yang muncul pada elevasi yang cukup tinggi akan memudahkan pendistribusian ke tempat yang lebih rendah. Kelas elevasi pemunculan mata air dibedakan menjadi 2 (dua) kelas, yaitu: mata air yang muncul pada elevasi kurang dari 20 mdpl, dan mata air yang muncul pada elevasi di atas 20 mdpl. Berdasarkan ketinggiannya mata air Paisu Lalomo berada pada ketinggian 557 mdpl yang secara alami mempunyai jangkauan distribusi air yang lebih luas karena mata air muncul pada elevasi tinggi. Debit mata air Paisu Lalomo sebesar >15.000 Lt/dt dan saat ini dimanfaatkan sebagai sumber air minum masyarakat di Desa Lemelu Kecamatan Bulagi Selatan dan rencananya akan dimanfaatkan sebagai sumber air minum oleh PDAM untuk masyarakat di 3 (tiga) kecamatan lainnya yaitu Kecamatan Bulagi Selatan, Bulagi dan Buko Selatan.

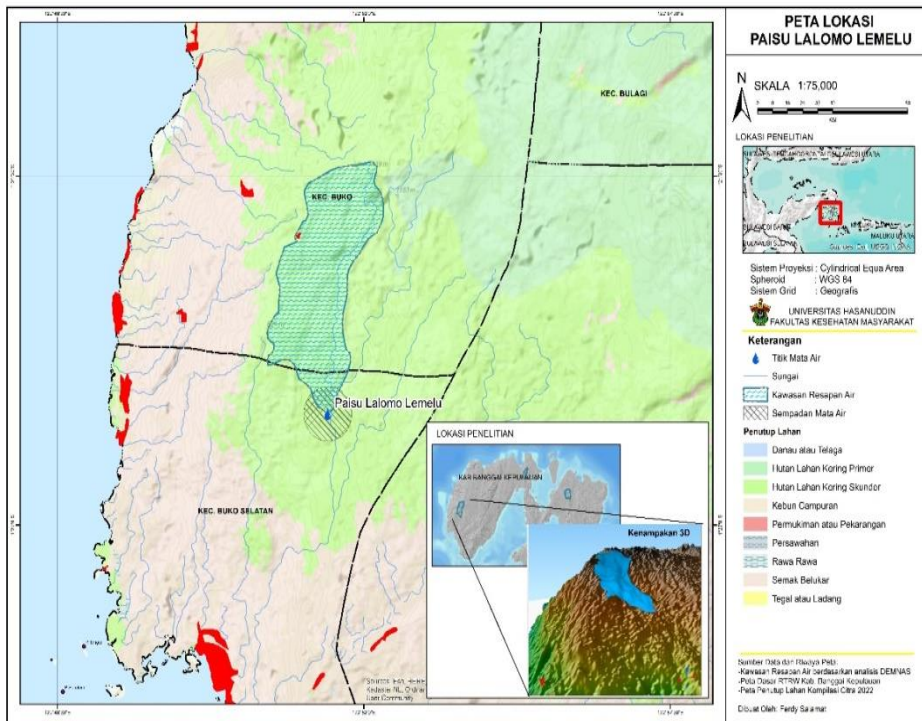
Kondisi lingkungan disekitar mata air masih berhutan yang merupakan hutan sekunder dan dikelilingi oleh ladang perkebunan masyarakat serta merupakan daerah pengembalaan ternak masyarakat di Desa Lemelu dan Desa Osan Kec. Bulagi Selatan. Berdasarkan Data Dinas Pertanian Kab. Banggai Kepulauan jumlah populasi ternak Tahun 2022 di Kec. Bulagi Selatan sejumlah 13.798 ekor terdiri dari sapi 3433 ekor, kuda 94 ekor, kambing 2679 ekor dan babi 7686 ekor. Pemanfaatan mata air sebagai sumber air minum dan kondisi lingkungan disekitar mata air dapat dilihat pada Gambar 9 sebagai berikut.



Gambar 9. Pemanfaatan Mata Air dan kondisi Lingkungan di sekitar Mata Air Paisu Lalomo

Hasil analisis keruangan (spasial) daerah tangkapan air (DTA) mata air Paisu Lalomo seluas 1523,27 Ha dengan penutupan lahan berupa hutan sekunder seluas 1523,27 Ha dan terdapat juga kawasan pemukiman masyarakat Dusun Sisipan seluas 1,84 Ha. Tipe ekosistem pada mata air ini adalah ekosistem karst dengan tipe komunitas vegetasi hutan batugamping monsun pamah pada bentang lahan dataran solusional karst bermaterial batuan sedimen karbonat dan perbukitan solusional karst bermaterial batuan sedimen karbonat. Peta daerah tangkapan air (DTA) mata air Paisu Lalomo dan penampakan 3 Dimensi dapat dilihat pada Gambar 10.

Berdasarkan genesis dan karakteristik mata air serta kondisi tutupan lahan di daerah tangkapan air (DTA) mata air Paisu Lalomo Kec. Buko Selatan diidentifikasi sumber pencemaran air berasal dari aktifitas manusia yaitu kegiatan domestik, perladangan, perkebunan, pertanian dan peternakan.



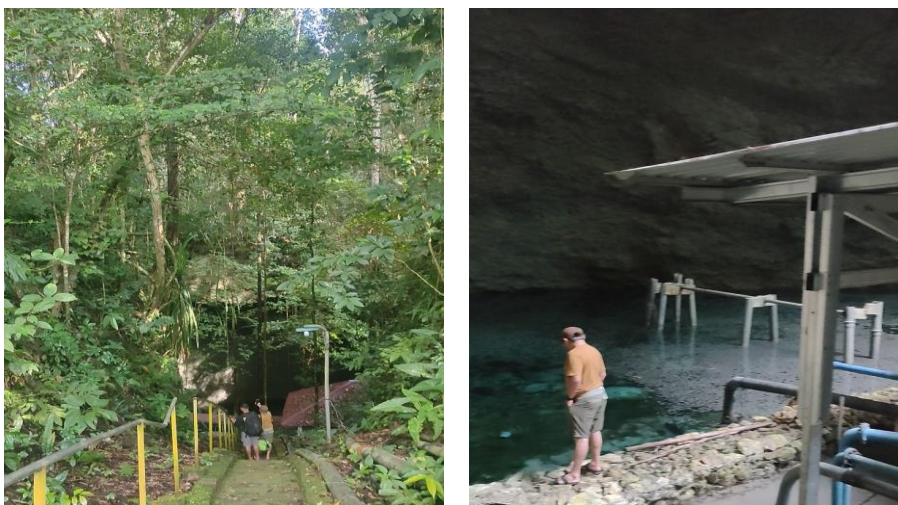
Gambar 10. Peta Daerah Tangkapan Air (DTA) Mata Air dan Penampakan 3 Dimensi DTA Mata Air Paisu Lalomo

2. Mata Air Paisu Olulan

Mata air Paisu Olulan terletak di Desa Bangunemo Kec. Bulagi Utara, berdasarkan sistem hidrologinya merupakan mata air *dolinee* atau runturan yang berada pada batugamping napalan Formasi Salodik. Mata air *dolinee* atau runturan yaitu mata air yang terbentuk akibat runturan atap gua yang pada bagian dasar gua terdapat lubang pelarutan (ponors) dan terhubung dengan sistem sungai bawah tanah. Akibat tekanan hidrostatik ke atas (mengikuti hukum bejana berhubungan), maka sungai bawah tanah akan menerobos lubang ponor, sehingga gua terisi air dan membentuk genangan yang tidak pernah kering. Runtuhnya atap gua, menyebabkan genangan air di dalam gua terlihat dari permukaan yang menyerupai mata air (genangan).

Elevasi atau ketinggian lokasi pemunculan mata air dianggap penting, karena mata air yang muncul pada elevasi yang cukup tinggi akan memudahkan pendistribusian air ke tempat yang lebih rendah. Kelas elevasi pemunculan mata air dibedakan menjadi 2 (dua) kelas, yaitu: mata air yang muncul pada elevasi kurang dari 20 mdpl dan mata air yang muncul pada elevasi di atas 20 mdpl. Berdasarkan ketinggiannya mata air Paisu Olulan berada pada ketinggian 167,35 mdpl yang secara alami mempunyai

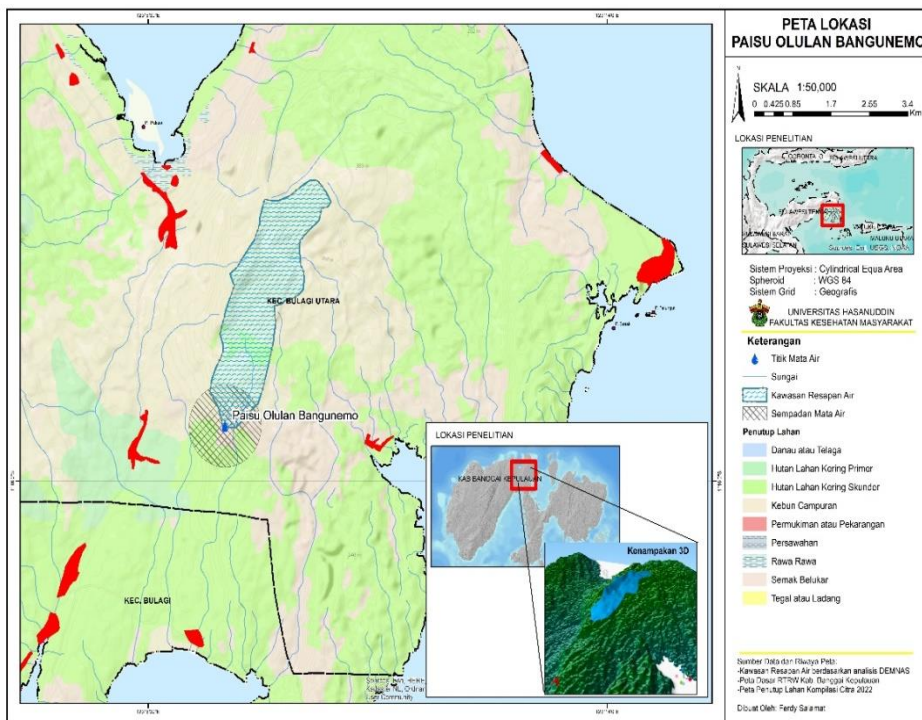
jangkauan distribusi air yang lebih luas karena mata air muncul pada elevasi yang tinggi. Mata air Paisu Olulan saat ini dimanfaatkan PDAM sebagai sumber air minum masyarakat di Kecamatan Bulagi dan Kecamatan Bulagi Utara. Kondisi lingkungan disekitar mata air masih berhutan yang merupakan hutan sekunder dan dikelilingi oleh ladang perkebunan masyarakat berupa kelapa, coklat dan tanaman lainnya. Data ternak dari Dinas Pertanian Kab. Banggai Kepulauan Tahun 2022 di Kec. Bulagi Utara sebanyak 10.261 ekor terdiri dari sapi 833 ekor, kambing 2996 ekor dan babi 6483 ekor. Pola ternak masyarakat disekitar daerah tangkapan mata air dengan metode pengembalaan atau lepasliaran. Pemanfaatan mata air sebagai sumber air minum dan kondisi lingkungan disekitar mata air dapat dilihat pada Gambar 11 sebagai berikut.



Gambar 11. Pemanfaatan Mata Air dan kondisi Lingkungan di sekitar Mata Air Paisu Olulan

Hasil analisis keruangan (spasial) daerah tangkapan air (DTA) mata air Paisu Olulan seluas 539,92 Ha dengan penutupan lahan berupa hutan sekunder seluas 39,38 Ha, kebun campuran seluas 484,67 Ha dan Semak belukar seluas 15,86 Ha. Tipe ekosistem pada mata air ini adalah ekosistem karst dengan tipe komunitas vegetasi hutan batugamping monsun pamah pada bentang lahan dataran solusional karst bermaterial batuan sedimen karbonat dan perbukitan solusional karst bermaterial batuan sedimen karbonat. Peta daerah tangkapan air (DTA) mata air Paisu Olulan dan penampakan 3 Dimensi dapat dilihat pada Gambar 12.

Berdasarkan genesis dan karakteristik mata air serta kondisi tutupan lahan di daerah tangkapan air (DTA) mata air Paisu Olulan Kec. Bulagi Utara diidentifikasi sumber pencemaran air berasal dari aktifitas manusia yaitu kegiatan domestik, perladangan, perkebunan, pertanian dan peternakan.



Gambar 12. Peta Daerah Tangkapan Air (DTA) Mata Air dan Penampakan 3 Dimensi DTA Mata Air Paisu Olulan

3. Mata Air Paisu Taabak

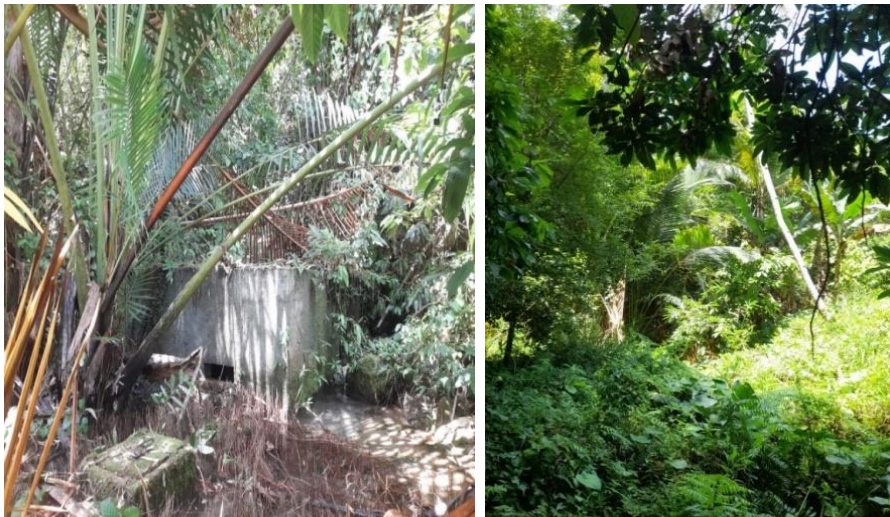
Mata air Paisu Taabak terletak di Desa Liang Kec. Liang, berdasarkan sistem hidrologinya, mata air ini bertipe percelahan (*diffuse*). Mata air tipe *diffuse* merupakan mata air yang diimbuh atau mengalir melalui akuifer primer, yaitu melalui pori-pori (porositas) atau celah-celah batuan yang berukuran kecil. Tipe mata air ini berkembang pada batugamping terumbu Formasi Peling.

Berdasarkan cara pembentukannya mata air Paisu Taabak adalah mata air yang dikategorikan tipe topografi yaitu merupakan mata air yang muncul karena terpotongnya muka airtanah oleh topografi, yang pada umumnya muncul pada lereng-lereng perbukitan tanpa dikontrol oleh struktur geologi berupa sesar (patahan). Mata air tipe ini pada umumnya berupa mata air percelahan dengan debit aliran yang kecil atau mempunyai fluktuasi aliran yang besar antara penghujan dan kemarau.

Elevasi atau ketinggian lokasi pemunculan mata air dianggap penting, karena mata air yang muncul pada elevasi yang cukup tinggi akan memudahkan pendistribusian air ke tempat yang lebih rendah. Kelas elevasi pemunculan mata air dibedakan menjadi 2 (dua) kelas, yaitu: mata air yang

muncul pada elevasi kurang dari 20 mdpl, dan mata air yang muncul pada elevasi di atas 20 mdpl. Mata air Paisu Tabaak berada pada ketinggian 166,66 mdpl yang secara alami dapat menjangkau distribusi air yang lebih luas. Mata air Paisu Taabak memiliki debit aliran 350 Lt/dt dan telah digunakan oleh PDAM sebagai sumber air bersih (domestik) bagi masyarakat. Saat ini dimanfaatkan sebagai sumber air minum masyarakat di Ibukota Kecamatan Liang.

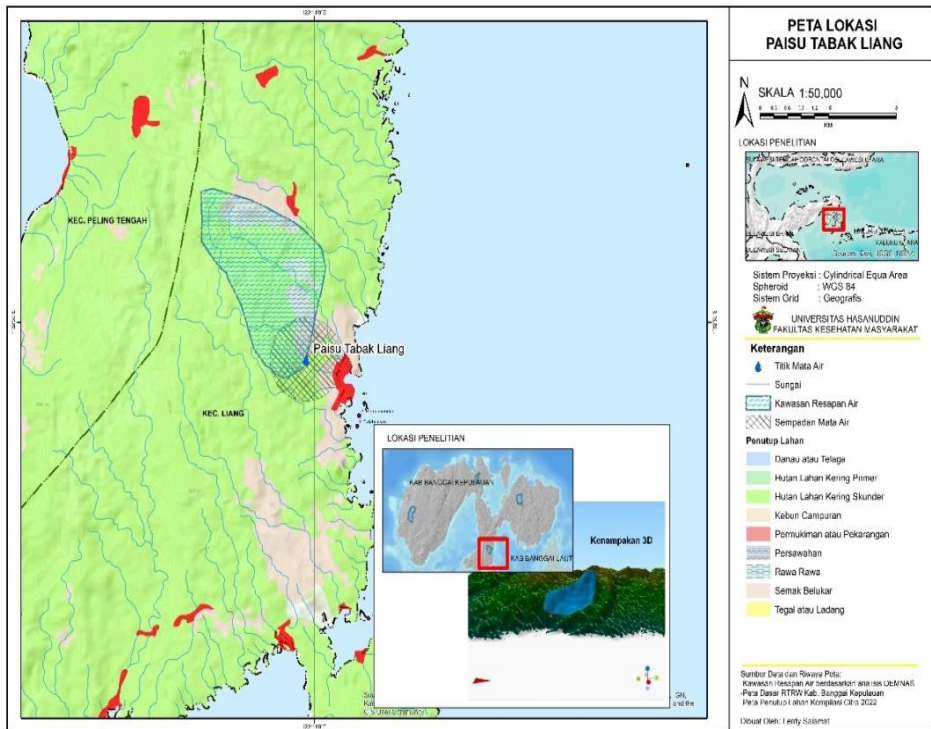
Kondisi lingkungan disekitar mata air masih berhutan yang merupakan hutan sekunder dan dikelilingi oleh ladang perkebunan masyarakat berupa durian, kelapa, coklat, kemiri dan tanaman lainnya. Data ternak dari Dinas Pertanian Kab. Banggai Kepulauan Tahun 2022 di Kec. Liang sebanyak 2888 ekor terdiri dari sapi 246 ekor, kambing 1501 ekor dan babi 1156 ekor. Pola ternak masyarakat dengan metode pengembalaan atau lepasliaran. Pemanfaatan mata air sebagai sumber air minum dan kondisi lingkungan disekitar mata air dapat dilihat pada Gambar 13 sebagai berikut.



Gambar 13. Pemanfaatan Mata Air dan kondisi Lingkungan di sekitar Mata Air Paisu Taabak

Hasil analisis keruangan (spasial) daerah tangkapan air (DTA) mata air Paisu Taabak seluas 596,52 Ha dengan penutupan lahan berupa hutan sekunder seluas 454,23 Ha, kebun campuran seluas 24,19 Ha dan Semak belukar seluas 118,09 Ha. Tipe ekosistem pada mata air ini adalah ekosistem karst dengan tipe komunitas vegetasi hutan batugamping monsun pamah pada bentang lahan dataran solusional karst bermaterial batuan sedimen karbonat dan perbukitan solusional karst bermaterial batuan sedimen karbonat. Peta daerah tangkapan air (DTA) mata air Paisu Taabak dan penampakan 3 Dimensi dapat dilihat pada Gambar 14. Berdasarkan genesis dan karakteristik mata air serta kondisi tutupan lahan di daerah

tangkapan air (DTA) mata air Paisu Taabak Kec. Liang diidentifikasi sumber pencemaran air berasal dari aktifitas manusia yaitu kegiatan domestik, perladangan, perkebunan, pertanian dan peternakan.



Gambar 14. Peta daerah tangkapan air (DTA) mata air Paisu Taabak

4. Mata Air Paisu Sinangkal

Mata air Paisu Sinangkal terletak di Desa Ponding - Ponding Kec. Tinangkung Utara, berdasarkan sistem hidrologinya, mata air memiliki tipe percelahan (*diffuse*). Mata air tipe *diffuse* merupakan mata air yang diimbuh atau mengalir melalui akuifer primer, yaitu melalui pori-pori (porositas) atau celah-celah batuan yang berukuran kecil dan tidak melalui sistem perguanaan. Tipe mata air ini berkembang pada batugamping napalan Formasi Salodik. Keterdapatn perlapisan dan napal pada Formasi Salodik menyebabkan rongga-rongga perlarutan dan sistem perguanaan tidak berkembang dengan baik.

Berdasarkan cara pembentukannya mata air Paisu Sinangkal adalah mata air yang dikategorikan tipe topografi yaitu merupakan mata air yang muncul karena terpotongnya muka airtanah oleh topografi, yang pada umumnya muncul pada lereng-lereng perbukitan tanpa dikontrol oleh struktur geologi berupa sesar (patahan). Mata air tipe ini pada umumnya

berupa mata air percelahan dengan debit aliran yang kecil atau mempunyai fluktuasi aliran yang besar antara penghujan dan kemarau.

Elevasi atau ketinggian lokasi pemunculan mata air dianggap penting, karena mata air yang muncul pada elevasi yang cukup tinggi akan memudahkan pendistribusian air ke tempat yang lebih rendah. Kelas elevasi pemunculan mata air dibedakan menjadi 2 (dua) kelas, yaitu: mata air yang muncul pada elevasi kurang dari 20 mdpl, dan mata air yang muncul pada elevasi di atas 20 mdpl. Mata air Paisu Sinangkal berada pada ketinggian 212,02 mdpl dengan debit aliran sebesar 450 Lt/dt dan telah digunakan PDAM sebagai sumber air bersih (domestik) bagi masyarakat. Saat ini dimanfaatkan sebagai sumber air minum masyarakat di ibukota Kabupaten Banggai Kepulauan dan Kecamatan Tinangkung Utara.

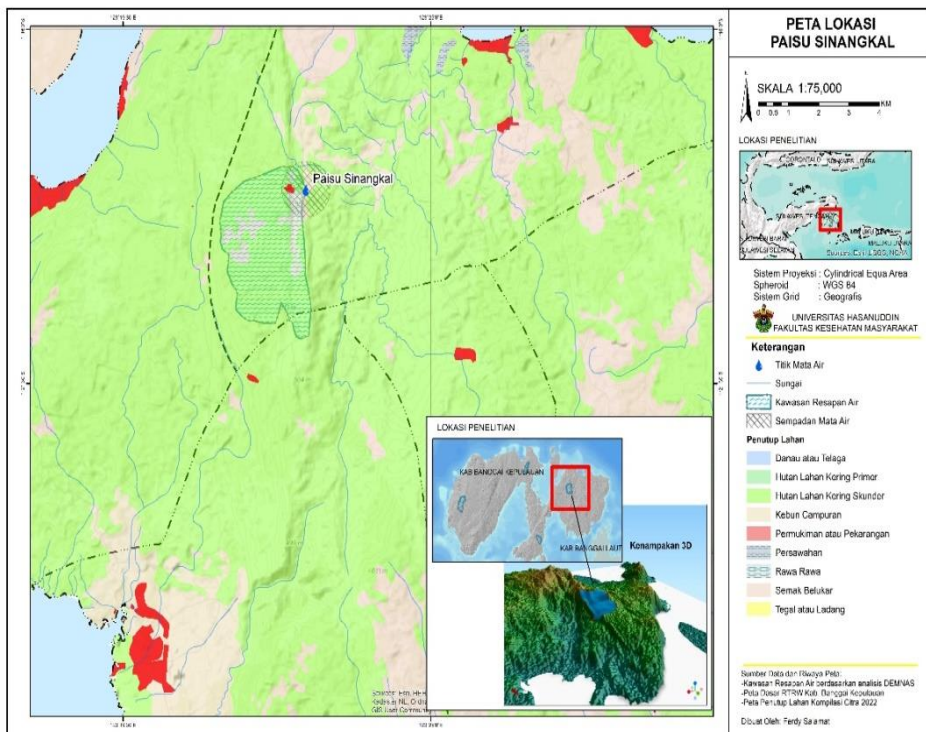
Kondisi lingkungan disekitar mata air masih ber hutan yang merupakan hutan sekunder dan dikelilingi oleh ladang perkebunan masyarakat berupa kelapa, coklat, kemiri dan tanaman lainnya. Data ternak dari Dinas Pertanian Kab. Banggai Kepulauan Tahun 2022 di Kec. Tinangkung Utara sebanyak 7357 ekor terdiri dari sapi 3300 ekor, kambing 3314 ekor dan babi 743 ekor. Pola ternak masyarakat dengan metode pengembalaan atau lepasliaran. Pemanfaatan mata air sebagai sumber air minum dan kondisi lingkungan disekitar mata air dapat dilihat pada Gambar 15 sebagai berikut.



Gambar 15. Pemanfaatan Mata Air dan kondisi Lingkungan di sekitar Mata Air Paisu Sinangkal

Berdasarkan hasil analisis keruangan (spasial) daerah tangkapan air (DTA) mata air Paisu Sinangkal seluas 1077,27 Ha dengan penutupan lahan berupa hutan sekunder seluas 865 Ha, kebun campuran seluas 89,35 Ha, Semak belukar seluas 86,75 Ha dan pemukiman seluas 5,55 Ha. Tipe ekosistem pada mata air ini adalah ekosistem karst dengan tipe komunitas

vegetasi hutan batugamping monsun pamah pada bentang lahan dataran solusional karst bermaterial batuan sedimen karbonat dan perbukitan solusional karst bermaterial batuan sedimen karbonat. Peta daerah tangkapan air (DTA) mata air Paisu Sinangkal dan penampakan 3 Dimensi dapat dilihat pada Gambar 16. Berdasarkan genesis dan karakteristik mata air serta kondisi tutupan lahan di daerah tangkapan air (DTA) mata air Paisu Taabak Kec. Liang diidentifikasi sumber pencemaran air berasal dari aktifitas manusia yaitu kegiatan domestik, perladangan, perkebunan, pertanian dan peternakan.



Gambar 16. Peta daerah tangkapan air (DTA) mata air Paisu Sinangkal

2.4.2 Pembahasan

2.4.2.1 Geologi Daerah Tangkapan Air

Kawasan Karst di Kabupaten Banggai Kepulauan berkembang pada dua formasi batugamping, yaitu: batugamping berlapis dari Formasi Salodik (berumur Eosen – Miosen) dan batugamping terumbu dari Formasi Peleng (berumur kuartar). Penyebaran kedua jenis batugamping tersebut menempati area yang sangat luas, yaitu 85% dari wilayah Kabupaten Banggai Kepulauan. Secara umum wilayah Banggai Kepulauan didominasi oleh ekosistem karst, namun jika ditinjau pada skala lebih rinci, di wilayah ini ditemukan beberapa tipe ekosistem. Tipe ekosistem tersebut berkembang pada 7 macam bentang lahan

(*landform*) yang berupa dataran fluvial, dataran pantai, dataran solusional karst, perbukitan solusional karst, perbukitan struktural lipatan, perbukitan struktural plutonik, perbukitan vulkanik. Karakter morfologi, fisik dan kimia bentang lahan sebagai tempat tumbuh atau habitat bagi tumbuhan tentu akan berpengaruh terhadap fisiologi dan karakter spesies tumbuhan. Hasilnya kemudian membentuk kelompok-kelompok ekosistem dan komunitas vegetasi yang beradaptasi atau sesuai dengan lingkungannya (BPEE KLHK, 2017).

Kabupaten Banggai Kepulauan merupakan gugusan pulau yang terbentuk oleh interaksi antara Lempeng Benua Australia yang bergerak relatif ke arah utara dan Lempeng Samudra Pasifik yang bergerak ke arah barat. Banggai Kepulauan, menurut penyelidikan geologi dikatakan sebagai pecahan dari Benua Australia yang terdesak ke barat oleh Lempeng Samudra Pasifik. Tenaga tektonik inilah yang menjadikan Banggai Kepulauan mengalami pensesaran yang sangat intensif. Pola-pola struktur sesar yang tegas dapat dilihat dari kesan morfologi. Pola struktur dominan di Banggai Kepulauan (Pulau Peling) mempunyai arah jurus (*strike*) timurlaut - baratdaya dan baratlaut – tenggara. Pulau Peling yang merupakan pulau terbesar di Banggai Kepulauan merupakan ekspresi dari dua pola struktur tersebut. Garis pantai Kecamatan Buko (sisi barat), garis pantai Kecamatan Bulagi - Bulagi Selatan dan Tinangkung - Peling Tengah (sisi tengah), dan garis pantai Kecamatan Totikum - Totikum Selatan (sisi timur), merupakan ekspresi dari pola struktur timurlaut – baratdaya.

Sesar-sesar naik dan turun tersebut menyebabkan batuan yang mendasari Pulau Peling berupa batugamping terangkat dan tersingkap di permukaan. Kondisi inilah yang kemudian mengontrol pola pemunculan mata air di Kabupaten Banggai Kepulauan. Batuan permukaan (*cap rock*) Pulau Peling sebagian besar berupa batugamping terumbu Formasi Peling yang berumur Kuartar, dan batugamping napal berlapis Formasi Salodik yang berumur Eosen-Miosen. Mata air yang masuk pada Formasi Salodik yaitu mata air Paisu Lalomo, Paisu Olulan dan Paisu Sinangkal sedangkan Formasi Peling yaitu Paisu Taabak.

Keterdapatannya batugamping dengan dasar batuan metamorf yang mengalami pensesaran disertai dengan kekar yang intensif, merupakan salah satu faktor yang mengontrol pemunculan sebagian mata air. Mataair yang terkontrol oleh keterdapatannya sesar yaitu mata air Paisu Lalomo Kec. Buko Selatan sedangkan mata air Paisu Olulan Kec. Bulagi Utara terbentuk dari runtuhnya oleh proses pelarutan yang sebagai bagian dari sistem sungai bawah tanah berupa genangan yang relatif tetap sepanjang tahun dan Mata air Paisu Taabak Kec. Liang merupakan mata air percelahan (*Diffuse*) yang keluar dari celah Batugamping terumbu Formasi Peling dan Paisu Sinangkal Kec. Tinangkung Utara merupakan mata air percelahan (*Diffuse*) yang keluar dari celah Batugamping Napalan Formasi Salodik.

Berdasarkan cara pembentukannya. mata air percelahan yang berada pada batugamping napalan Formasi Salodik yang terpotong sesar atau patahan membentuk topografi lereng curam atau terjal. Bahwa zona sesar merupakan konsentrasi aliran airtanah terdapat sistem perguaan yang membentuk sungai bawah tanah. Pemunculan mata air tipe ini terjadi bukan karena kontak perlapisan batuan, tetapi akibat airtanah yang mengalir melalui percelahan batugamping atau sistem sungai bawah tanah yang terpotong oleh zona sesar. Mata air tipe ini pada umumnya berupa mata air percelahan dengan debit aliran yang kecil atau mempunyai fluktuasi aliran yang besar antara penghujan dan kemarau.

Karakteristik batuan karbonat yg menyusun kedua formasi yaitu Formasi Salodik dan Formasi Peling terkait bagaimana hubungannya dengan masuknya air kedalam tubuh karst adalah bahwa bertambahnya usia batuan batugamping, pengaruhnya terhadap debit mata air yang muncul semakin berkurang. Hal ini mungkin karena proses pemadatan dan perekatan menjadi lebih intensif saat batuan berkembang, sehingga rongga antar butir menjadi lebih kecil, sehingga nilai kesarangan dan kelulusannya berkurang. Akibatnya, debit airnya juga akan lebih rendah dibandingkan dengan debit air pada formasi lain. Selama formasi batugamping Miosen yaitu formasi salodik, proses pelarutan yang lebih intensif terjadi, yang menghasilkan nilai kelulusan yang lebih tinggi seiring bertambahnya umur batugamping. Akibatnya, debit mata air yang muncul melalui zona pelarutan tersebut juga lebih besar.

Disamping faktor geomorfologi, kondisi geohidrologi, termasuk kelulusan akuifer (*permeabilitas*), luas daerah imbuh, dan besarnya imbuh, memengaruhi munculnya mata air di suatu wilayah. Sifat kelulusan akuifer sangat dipengaruhi oleh jenis material batuan yang ada. Air dapat ditemukan di akuifer berproduksi sedang dengan penyebaran luas karena celah batuan dan bahan piroklastik dapat menyimpan air dalam rongga antar butirannya.

Hasil penelitian oleh Verest Marton, 2020 menyebutkan bahwa batuan penyusun karst, karst mungkin saja ada karst karbonat (batu kapur, dolomit, marmer) karst evaporit (gypsum, halit, kalium) dan karst batuan lain (misalnya batupasir) larut dalam derajat yang lebih rendah dan lebih besar. Di antara karst karbonat dan karst evaporasi, pada dasarnya terdapat perbedaan laju disolusi yang juga dapat diwujudkan dalam ukuran dan kepadatan ciri-ciri yang berkembang (misalnya jika karst karbonat dibandingkan dengan karst gypsum).

Perbedaan tersebut juga dapat mengakibatkan berkembangnya fitur-fiturnya hancur dan karstnya tertutup residu pelapukan (misalnya halit) dengan efek yang besar jumlah curah hujan. Namun, di wilayah beriklim sedang sabuk, intensitas pelarutan yang bervariasi juga terlihat pada perbedaan ciri daerah dolomit dan batugamping karst karbonat batuan ini terjadi pada pH rendah (Verest Marton, 2020).

2.4.2.2 Hidrologi

Sirkulasi air daerah karst sangat khas dibanding sirkulasi air umumnya, dapat dilihat adanya morfologi khas yang dibentuk. Beberapa pendapat seperti Grund (awal abad 20) bahwa air yang memasuki rekahan-rekahan batuan akan bersirkulasi dalam lapisan-lapisannya, hingga menetap pada suatu bidang air tanah yang berhubungan satu sama lain melalui celah yang ada. Diatas air tanah ini terdapat masa air yang lebih mobil dan berfluktuasi secara musiman, bergerak secara lateral disebut air karst. Diatas lapisan air karst di dapatkan air atmosferik yang bersirkulasi dalam batugamping.

Hidrologi karst memiliki karakteristik yang unik, berbeda dengan sistem hidrologi umum pada batuan lain. Karst merupakan bentanglahan yang dicirikan oleh keberadaan gua dan hidrologi bawah tanah (sungai bawah tanah), yang berkembang pada batuan mudah larut. Batuan mudah larut merupakan prasarat dari perkembangan bentanglahan karst, yang dalam kasus di Kabupaten Banggai Kepulauan berupa batugamping (*limestone*).

Daerah karst aliran air di bawah tanah tidak menyatu, tetapi mengalir melalui konduits yang terpisah satu sama lain dan independen. Jadi air hanya mengalir melalui celah-celah yang terpisah satu sama lain oleh lapisan batugamping yang kedap air dan mengalir kebawah sampai lapisan kedap air tanpa dipengaruhi ketinggian permukaan air laut. Karst memiliki karakteristik berupa adanya aliran air di bawah tanah, dan tidak adanya aliran permukaan. Karakteristik airtanah disebut sebagai geohidrologi karst. Geohidrologi karst memiliki batasan yang terkait keterdapatannya yaitu akuifer (aquifer), akiklud (aquiclude), dan akuitard (aquitard) (Sudarmadji, 2013).

Berdasarkan sistem hidrologi, ke empat (4) mata air dibedakan menjadi 2 (dua) tipe, yaitu: tipe percelahan (*diffuse atau fissure*) yaitu mata air Paisu Taabak Kec. Liang dan Paisu Sinangkal Kec. Tinangkung Utara dan tipe lorong perguaan (*conduit*) yaitu mata air Paisu Lalomo Kec. Buko Selatan. Sedangkan mata air Paisu Olulan Kec. Bulagi Utara adalah mata air doline atau runtuhan. Sistem dengan lorong (*Conduit*) yaitu mata air yang keluar dari sistem perguaan. Mata air tipe ini memiliki debit yang sangat besar, besarnya debit aliran mata air tipe ini disebabkan karena sistem perguaan menjadi konsentrasi aliran air tanah. Sistem runtuhan (*Dolinee*) yaitu yang mata air yang terbentuk akibat runtuhan atap gua yang pada bagian dasar gua terdapat lubang pelarutan (*ponors*) dan terhubung dengan sistem sungai bawah tanah. Dan terakhir melalui celah-celah (*Diffuse*) yaitu melalui pori-pori (porositas) atau celah-celah batuan yang berukuran kecil. Tipe mata air ini berkembang pada batugamping terumbu Formasi Peling.

Hasil penelitian sejalan dengan Dewi, 2018 bahwa Pola persebaran mata air bergerombol berdasarkan analisis tetangga terdekat. Tersebar di bagian wilayah dengan satuan unit bentukan asal yaitu bagian selatan di Lereng dan Perbukitan Tererosi (K3) dan di bagian timur Dataran Aluvial Karst (K7).

Menurut tenaga pemunculannya, mata air di Kecamatan Kayen merupakan mata air gravitasi dengan jenis mata air depresi dan rekahan. Pemunculan dan karakteristik mata air di Kecamatan Kayen dipengaruhi oleh batuan penyusun yaitu batu pasir dan batu gamping.

Kawasan karst jarang memiliki aliran permukaan yang besar. Hal ini dikarenakan oleh porositas batuan yang besar. Porositas yang ada pada pada kawasan karst merupakan hasil dari proses pelarutan. Air tanah yang terdapat pada kawasan karst terdapat pada pori primer dari akuifer sedangkan pada kawasan karst airtanah terdapat pada pori sekunder. Pori sekunder terdapat pada goa goa yang ada di dalam tanah. Aliran air sungai bawah tanah juga merupakan bentuk dari pori sekunder kawasan karst (Salsabilla, 2021).

2.4.2.3 Tutupan Lahan

Kajian spasial terhadap wilayah ekoregion di Banggai Kepulauan diperoleh informasi bahwa paling sedikit ada 5 tipe ekosistem, yaitu ekosistem karst, ekosistem lahan pamah, ekosistem pegunungan, ekosistem riparian, ekosistem mangrove. Selain itu diperoleh informasi di wilayah Banggai Kepulauan ini terdapat 2 kelompok iklim yaitu iklim basah dan iklim monsun (kering). Iklim ini juga berpengaruh terhadap pertumbuhan spesies dan membentuk karakteristik adaptif yang berbeda bagi komunitas vegetasinya baik untuk wilayah basah maupun kering. Sesuai dengan wilayah yang berupa kepulauan, maka selain ekosistem mangrove di wilayah juga berkembang ekosistem pantai. Dengan kondisi alam di wilayah ini juga berkembang komunitas vegetasi dengan karakter adaptif kepada wilayah basah, kering, dan pantai (BPEE KLHK, 2017).

Tutupan dan penggunaan lahan pada setiap mata air berdasarkan hasil obesrvasi lapangan dan analisis spasial menggunakan Digital Elevation Model Nasional (DENMAS) dari Badan Informasi Geospasial (BIG) untuk pemodelan titik tinggi batas daerah tangkapan air hujan dan analisis Citra Google Earth Tahun 2022. Terdapat 3 mata air yang didominasi oleh hutan sekunder yaitu mata air Paisu Lalomo, Paisu Sinangkal dan Paisu Taabak sedangkan mata air Paisu Olulan didominasi tutupan lahan berupa kebun campuran. Sedangkan 2 daerah tangkapan air mata air yang tutupan lahannya merupakan pemukiman masyarakat yaitu mata air Paisu Lalomo dan Paisu Sinangkal.

Tipe ekosistem pada keempat mata air adalah ekosistem karst dengan tipe komunitas vegetasi hutan batugamping monsun pamah pada bentang lahan dataran solusional karst bermaterial batuan sedimen karbonat dan perbukitan solusional karst bermaterial batuan sedimen karbonat. Kondisi tutupan lahan di daerah tangkapan air (DTA) mata air diidentifikasi sumber pencemaran air berasal dari aktifitas manusia yaitu kegiatan domestik, perladangan, perkebunan, pertanian dan peternakan.

Tingkat pengelolaan dengan intensitas tertentu mampu mengubah tingkat kepadatan dan kelembaban tanah yang berperan dalam menentukan jumlah air

yang mampu terserap kedalam tanah sehingga apabila dengan fenomena semakin tinggi tingkat kepadatan tanah, kemungkinan besar mengurangi kecepatan infiltrasi tanahnya (Sari *et al.*, 2012). Pergeseran penggunaan guna lahan dapat mempengaruhi wilayah atau daerah resapan air hujan melalui mekanisme perubahan kemampuan serta tingkat pengolahan lahannya (Fardani *et al.*, 2020).

Wilayah DAS sebagai satu kesatuan wilayah daratan berperan untuk meneruskan, menyimpan, dan mengalirkan air agar dapat dimanfaatkan. Menurut Nawawi dan Sanjoto (2014), daerah aliran sungai memiliki keterkaitan dengan kondisi biofisik disekitarnya terutama di wilayah hulu sebagai daerah tangkapan air, sehingga perlu untuk mengidentifikasi komponen-komponen yang berpengaruh terhadap infiltrasi tanah. Kapasitas infiltrasi selanjutnya dipengaruhi oleh berbagai faktor secara alami maupun melibatkan campur tangan manusia (Nita *et al.*, 2024).

2.4.2.4 Aktivitas Masyarakat di Daerah Tangkapan Air

Kondisi lingkungan disekitar daerah tangkapan air terdapat 3 mata air yang didominasi oleh hutan sekunder yaitu mata air Paisu Lalomo, Paisu Sinangkal dan Paisu Taabak sedangkan mata air Paisu Olulan didominasi tutupan lahan berupa kebun campuran. Keempat daerah tangkapan air mata air merupakan daerah pengembalaan ternak masyarakat seperti sapi, kambing dan babi. Terdapat 2 daerah tangkapan air mata air yang tutupan lahannya merupakan pemukiman masyarakat yaitu mata air Paisu Lalomo dan Paisu Sinangkal. Masyarakat Banggai Kepulauan sangat bergantung pada pemanfaatan mata air sebagai sumber air minum masyarakat, walaupun secara kondisi geografis pemunculan mata air yang berada ditepi pantai menyulitkan untuk dimanfaatkan karena telah bercampur dengan air laut.

Daerah tangkapan air di kawasan karst secara hidrologis kompleks dan merupakan contoh utama sistem lanskap yang kurang dipahami sehubungan dengan polusi mikroba (Buckerfield, Waldron, Quilliam, Naylor, Li, & Oliver, 2019a). Karst adalah medan geologi unik yang terbentuk pada batuan dengan tingkat kelarutan tinggi (Ford dan Williams, 2013), dimana rongga yang terbentuk akibat pelarutan memungkinkan air permukaan dan kontaminan yang terperangkap untuk menyusup langsung ke dalam sistem air tanah. Pelarutan di sepanjang aliran airtanah yang ada seperti rekahan dan patahan menghasilkan jalur aliran yang sangat cepat di saluran air bawah tanah (White, 2018). Sistem hidrologi tersebut mengakibatkan berkurangnya kapasitas kematian atau penghilangan *E. coli* melalui proses penyaringan alami sebelum air muncul kembali di mata air, yang digunakan di seluruh dunia untuk keperluan minum dan rumah tangga (Schiperski *et al.*, 2016; Stevanović, 2018).

Masyarakat di wilayah penelitian dalam memenuhi kebutuhan hidupnya dari hasil hutan dan hasil laut. Masyarakat yang beraktifitas di hutan biasanya pergi ke hutan pada pagi hari sekitar pukul 6 dan baru kembali ke rumah

setelah sore atau bahkan malam hari. Peralatan yang dibawa berupa bois (keranjang rotan) untuk membawa hasil kebun seperti ubi banggai, pisang, kelapa dan lainnya. Masyarakat memanfaatkan lahan-lahan subur (dekat mata air) untuk menanam tanaman pangan dengan melakukan pergantian dari lahan hutan sekunder menjadi lahan perkebunan. Proses pembukaan lahan dilakukan secara berpindah-pindah dengan membakar lahan karena tipisnya lapisan tanah.

Hasil penelitian oleh (Adiguna dan Wahyono, 2021) menemukan bahwa kegiatan masyarakat yang ditemukan di kawasan ini adalah kegiatan penambangan batu kapur dan menggunakan kawasan hutan untuk bercocok tanam. Kegiatan penambangan sangat berpotensi terhadap kerusakan lingkungan. Akibat pembukaan lahan di kawasan karst akan berdampak pada polusi air, tanah dan udara; berkurangnya flora, fauna dan keanekaragaman hayati; erosi tanah dan tanah longsor; perubahan lansekap serta degradasi lahan pertanian (Ringo & Mayengo, 2016; Lamare & Singh, 2016).

2.5 Kesimpulan

2.5.1 Singkapan batugamping di Pulau Peling mencapai hampir 80-90% dari seluruh luas wilayah Kabupaten Banggai Kepulauan, yang menyebabkan sebagian besar wilayah kajian memiliki karakteristik hidrologi karst, yang dicirikan oleh sistem hidrologi utama berupa akuifer percelahan (*diffuse*) dan lorong gua (*conduit*) yang membentuk sistem aliran sungai bawah tanah (*underground rivers*) pada batugamping terumbu Formasi Peling dan batugamping Napalan Formasi Salodik.

2.5.2 Tutupan dan penggunaan lahan daerah tangkapan air (DTA) mata air berada di sekitar tataguna lahan hutan sekunder, kebun campuran, semak belukar dan pemukiman.

2.5.3 Aktivitas masyarakat sehari-hari di sekitar daerah tangkapan air (DTA) mata air adalah pertanian, perkebunan, peternakan, dan aktivitas domestik lainnya.

2.6. Daftar Pustaka

- Adiguna, W. F., & Wahyono, H. (2021). Interaksi Kelembagaan dalam Pengelolaan dan Pemanfaatan Kawasan Ekologis Bentang Alam Karst Sukolilo di Kabupaten Pati. *Journal Of Biology Education*, 4(1), 1-22
- BPEE KLHK. (2017). Penataan Pengelolaan Kawasan Karst Kabupaten Banggai Kepulauan (Vol. 53, Issue 4). BPEE KLHK RI.
- BPLH BangKep. (2013). Kajian Potensi Mata Air dan Pengelolaannya. BPLH Kabupaten Banggai Kepulauan

- Dewi, T. D. 2018. Kajian Hidrogeomorfologi Mata Air Di Kawasan Karst Kecamatan Kayen Kabupaten Pati Jawa Tengah.
- Endah, R., Yoseph, B., Sukiyah, E., & Setiawan, T. (2017). Karakteristik sistem hidrogeologi karst berdasarkan analisis hidrokimia di Teluk Mayalibit, Raja Ampat. *Bulletin of Scientific Contribution: GEOLOGY*, 15(3), 217-222.
- Fardani, I., Mohmed, F.A.J. and Chofyan, I. (2020). Pemanfaatan prediksi tutupan lahan berbasis Cellular Automata-Markov dalam evaluasi rencana tata ruang. *Media Komunikasi Geografi* 21(2):157-171, doi:10.23887/mkg.v21i2.28121
- Ford, D., & Williams, P. (2013). Karst Hydrogeology and Geomorphology. In *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. <https://doi.org/10.1002/9781118684986>
- Husein, M. O. H. (2023). Evaluasi Kondisi Geologi Teknik Dan Analisis Daya Dukung Tanah Pondasi Dangkal Kawasan Perkantoran Pemerintah Kabupaten Buton Selatan Provinsi Sulawesi Tenggara (Doctoral dissertation, UPN "Veteran" Yogyakarta).
- Khansa, S. A. A. N., Widyastuti, M., Nugroho Adji, T., Naufal, M., Agus Riyanto, I., & Ramadhan, F. (2020). Water quality analysis of Bembem Doline Pond in Gunungsewu Karst area, Gunungkidul regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 451(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/451/1/012061>
- Lamare, R. E., & Singh, O. P. (2016). Limestone Mining and Its Environmental Implications in Meghalaya, India. *ENVIS Bulletin Himalayan Ecology*, 24, 87–100
- Nawawi, M. dan Sanjoto, T. (2014). Sebaran spasial laju infiltrasi sebagai upaya mengurangi degradasi lingkungan di DAS Beringin. *Geo-Image* 3(1):1-7, doi:10.15294/geoimage.v3i1.4318
- Nita, I., Ayuningtyas, P., Prijono, S., & Putra, A. N. (2024). ANALISIS KAPASITAS INFILTRASI LAHAN PERTANIAN DI SUB DAS KALISARI, MALANG . *Jurnal Tanah Dan Sumberdaya Lahan*, 11(1), 117–123. <https://doi.org/10.21776/ub.jtsl.2024.011.1.13>
- Ringo, J. E., & Mayengo, G. (2016). Effects of Limestone Mining on Deforestation and Land Degradation in Mbeya Region , Tanzania. *International Journal of Modern Social Sciences*, 5(2), 117–132
- Salsabila, A., & Kristianawati, A. D. (2021). Laporan Penelitian “Hidrologi Kawasan Karst Gunung Sewu Di Kecamatan Tanjung Sari Kabupaten Gunung Kidul Yogyakarta”.
- Sari, S.P., Ichwan, N. dan Susanto, E. (2012). Kajian laju infiltrasi tanah pada berbagai penggunaan lahan di Desa Tanjung Putus Kecamatan Padang Tualang Kabupaten Langkat. Universitas Sumatera Utara.
- Schiperski, F. (2018). Turbidity as an Indicator of Contamination in Karst Springs: A Short Review. 127–139. https://doi.org/10.1007/978-3-319-51070-5_14

- Sudarmadji. 2013. Mata Air Perspektif Hidrologis dan Lingkungan. Yogyakarta: Pascasarjana Universitas Gadjah Mada.
- Susilawati Nurhasanah Bachtiar. (2018). Biologi dasar Terintegerasi. (Publishing and Consulting company. 2018)
- Veress, M. (2020). Karst types and their karstification. *Journal of Earth Science*, 31(3), 621-634