

TUGAS AKHIR

**ANALISIS GEOKIMIA SUMBER PENCEMAR
TIMBAL PADA TANAH DAN AIR TANAH DI PESISIR
PARANGTRITIS, YOGYAKARTA, INDONESIA**

**”Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk
Memenuhi Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana (S1) Teknik
Lingkungan**



**Julian Bernhard Mangold
2153188**

**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2025**

TUGAS AKHIR
ANALISIS GEOKIMIA SUMBER PENCEMAR
TIMBAL PADA TANAH DAN AIR TANAH DI PESISIR
PARANGTRITIS, YOGYAKARTA, INDONESIA

Diajukan Kepada Universitas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Strata Satu (S1) Teknik
Lingkungan



Disusun oleh:

Julian Bernhard Mangold
21513188

Disetujui,
Dosen Pembimbing



Dhandhun Wacano, S.Si., M.Sc., Ph.D.

Tanggal: 20 Mei 2025

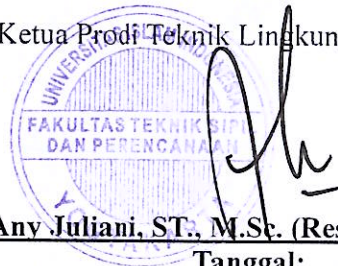


Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.

Tanggal: 22. 05 - 2025

Mengetahui,

Ketua Prodi Teknik Lingkungan FTSP UII



Any Juliani, ST., M.Sc. (Res.Eng.), Ph.D.

Tanggal:

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS GEOKIMIA SUMBER PENCEMAR TIMBAL PADA TANAH DAN AIR TANAH DI PESISIR PARANGTRITIS, YOGYAKARTA, INDONESIA

Telah diterima dan disahkan oleh Tim Penguji

Hari: Kamis

Tanggal: 22.05.2025

Disusun oleh:

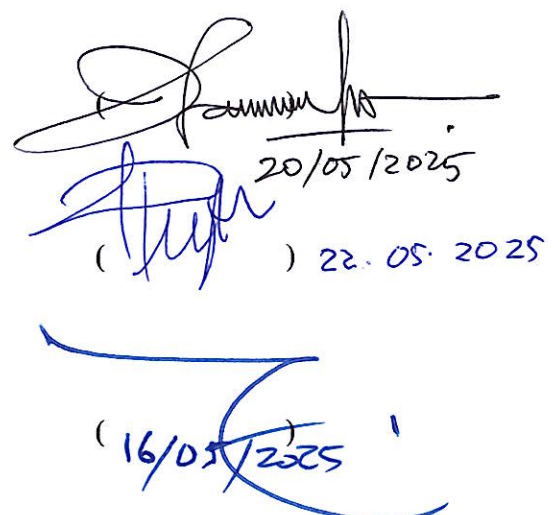
JULIAN BERNHARD MANGOLD
21513188

Tim penguji:

Dhandhun Wacano, S.Si., M.Sc., Ph. D.

Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D

Dr.-Ing. Ir. Widodo Brontowiyono, M.Sc.



Handwritten signatures and dates of the review team members:

- Signature of Dhandhun Wacano, dated 20/05/2025.
- Signature of Puji Lestari, dated 22.05.2025.
- Signature of Dr.-Ing. Ir. Widodo Brontowiyono, dated 16/05/2025.

PERNYATAAN

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Karya tulis ini adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik apapun, baik di Universitas Islam Indonesia maupun di perguruan tinggi lainnya.
2. Karya tulis ini adalah merupakan gagasan, rumusan dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain kecuali arahan Dosen Pembimbing.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama penulis dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Program *software* komputer yang digunakan dalam penelitian ini sepenuhnya menjadi tanggungjawab saya, bukan tanggungjawab Universitas Islam Indonesia.
5. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 5 Mai 2025

Yang membuat pernyataan,



Julian Bernhard Mangold

NIM: 21513188

PENGANTAR

Laporan Tugas Akhir ini, yang berjudul **Analisis Geokimia Sumber Pencemar Timbal Pada Tanah Dan Air Tanah Di Pesisir Parangtritis, Yogyakarta , Indonesia** disusun sebagai salah satu syarat akademik untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik di Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

Dalam proses penyusunan laporan ini, saya, sebagai penulis, ingin menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam kepada semua pihak yang telah memberikan dorongan dan dukungan, sehingga penyelesaian laporan tugas akhir ini dapat terlaksana dengan baik. Khususnya kepada :

1. Kedua orang tua, istri serta adik-adik saya, yang telah mendukung dalam pengerjaan laporan tugas akhir,
2. Dosen pembimbing saya, Bapak Dhandhun Wacano, S.Si., M.Sc., Ph. D dan Ibu Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D yang telah membimbing saya dalam mengerjakan laporan tugas akhir.
3. Semua staf laboratorium yang telah membantu saya dalam analisis di laboratorium.
4. Ketua Program Studi Teknik Lingkungan Ibu Ani Juliani ST., M.Sc.

Dalam penulisan tugas akhir ini, penulis menyadari bahwa hasil yang disajikan masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang konstruktif dari para pembaca, agar dapat memberikan manfaat bagi kita semua di masa mendatang.

Yogyakarta, 15 Mai 2025



Julian Bernhard Mangold

ABSTRACT

The use of inorganic fertilizer and pesticides can cause lead pollution on agricultural soil and groundwater, which is able to cause harm to human health. Previous research has showed that the local aquifer in Parangtritis Village is polluted with lead. This research aims to identify the effect of agricultural activities on the content of lead in soil and groundwater using geochemical analysis. Soil samples were taken at 5 locations at different soil depths. The lead content in was analysed using Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). The geochemical analysis included the calculation of the Enrichment Factor (EF), Geoaccumulation Index (I_{geo}), and Saturation Index (SI) modeling. The average soil lead content was 14,82 mg/kg. This value is below the quality standard for agricultural soil but exceeds the natural backgroundvalue (BGV) determined for the research area which is 5,59 mg/kg for the top soil layer and 8,08 mg/kg for the lower soil layer. The lead contamination was also shown by the EF of 2,30 and I_{geo} of 0,44 which are indicating slight soil contamination from geogenic and anthropogenic sources. The agricultural activities and geological conditions don't directly influence the lead introduced groundwater pollution. This conclusion is supported by the soil characteristics which inhibit the mobilization of lead and the SI modeling results showing that groundwater is undersaturated with respect to cerussite and anglesite minerals. This research concludes that the agricultural activities in teh study area has caused soil contamination but didn't influence the groundwater quality.

Keywords: agriculture, groundwater, lead, soil,

ABSTRAK

Penggunaan pupuk kimia dan pestisida dapat menyebabkan pencemaran timbal pada tanah dan air tanah yang membahayakan bagi kesehatan manusia. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa air tanah di daerah pertanian Desa Parangtritis telah tercemar timbal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh dari kegiatan pertanian terhadap kandungan timbal pada tanah dan air tanah dengan menggunakan metode analisis geokimia. Sampel tanah diambil dari lima lokasi pada dua lapisan tanah yang berbeda. Kandungan timbal pada tanah diukur dengan menggunakan alat Spektrofotometri Serapan Atom (SSA). Analisis geokimia yang dilaksanakan meliputi perhitungan *Enrichment Factor* (EF), *Geoaccumulation Index* (I_{geo}) dan pemodelan Indeks Saturasi (SI). Rata-rata kandungan timbal pada tanah di daerah penelitian adalah 14,82 mg/kg yang berada di bawah baku mutu untuk tanah pertanian. Kandungan ini menunjukkan kontaminasi tanah akibat kegiatan pertanian karena melebihi nilai *natural backgroundvalue* (BGV) yang ditentukan, yaitu 5,59 mg/kg untuk lapisan atas dan 8,08 mg/kg untuk lapisan bawah. Kontaminasi tersebut didukung oleh rata-rata nilai EF sebesar 2,30 dan rata-rata nilai I_{geo} sebesar 0,44 yang menunjukkan telah terjadi kontaminasi tanah ringan akibat kombinasi faktor geogenik dan antropogenik. Kegiatan pertanian dan kondisi geologis tidak merupakan sebab langsung dari pencemaran timbal pada air tanah Desa Parangtritis, hal itu didukung oleh sifat tanah yang menghambat perkolasi timbal dari permukaan sampai akuifer dan hasil pemodelan SI yang menunjukkan bahwa air tanah terhadap mineral *cerussite* and *anglesite* dalam kondisi *undersaturated*. Kesimpulan dari penelitian ini adalah bahwa penggunaan pupuk kimia dan pestisida telah menyebabkan kontaminasi tanah tetapi tidak mempengaruhi terhadap kualitas air daerah penelitian.

Kata Kunci: air tanah, pertanian, tanah, timbal,

ABSTRAKT

Die Verwendung von anorganischen Düngemitteln und Pestiziden kann zu einer Bleiverschmutzung des landwirtschaftlichen Bodens und des Grundwassers führen, was eine Gefahr für die menschliche Gesundheit darstellen kann. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass das lokale Grundwasserreservoir im Dorf Parangtritis mit Blei belastet ist. Diese Forschung zielt darauf ab, den Einfluss landwirtschaftlicher Aktivitäten auf den Bleigehalt im Boden und Grundwasser mittels geochemischer Analysen zu bestimmen. Bodenproben wurden an fünf Standorten in unterschiedlichen Bodentiefen entnommen. Der Bleigehalt wurde mittels Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) analysiert. Die geochemische Analyse umfasste die Berechnung des Anreicherungsfaktors (EF), des Geoakkumulationsindex (Igeo) und die Modellierung des Sättigungsindex (SI).

Der durchschnittliche Bleigehalt im Boden betrug 14,82 mg/kg. Dieser Wert liegt unterhalb des Qualitätsstandards für landwirtschaftliche Böden, übersteigt jedoch den natürlichen Hintergrundwert (BGV) des Untersuchungsgebiets, der mit 5,59 mg/kg für die oberste Bodenschicht und 8,08 mg/kg für die tiefere Bodenschicht bestimmt wurde. Die Bleikontamination wurde ebenfalls durch einen EF von 2,30 und einen Igeo von 0,44 nachgewiesen, was auf eine leichte Bodenverschmutzung durch geogene und anthropogene Quellen hinweist. Die landwirtschaftlichen Aktivitäten und die geologischen Bedingungen haben keinen direkten Einfluss auf die Bleiverschmutzung im Grundwasser. Diese Schlussfolgerung wird durch die Bodeneigenschaften gestützt, die die Mobilisierung von Blei hemmen, sowie durch die Ergebnisse der SI-Modellierung, die zeigen, dass das Grundwasser in Bezug auf die Mineralien Cerussit und Anglesit untersättigt ist. Die Studie kommt zu dem Schluss, dass die landwirtschaftlichen Aktivitäten im Untersuchungsgebiet eine Bodenverschmutzung verursacht haben, jedoch keinen Einfluss auf die Grundwasserqualität hatten.

Schlüsselwoerter: Agrikultur, Blei, Boden, Grundwasser

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN.....	1
PERNYATAAN.....	1
PENGANTAR.....	1
ABSTRACT.....	1
ABSTRAK.....	1
<i>ABSTRAKT</i>	1
DAFTAR ISI.....	1
DAFTAR NOTASI.....	1
DAFTAR TABEL.....	1
DAFTAR GAMBAR.....	1
DAFTAR LAMPIRAN.....	1
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian.....	4
1.4 Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Ruang Lingkup.....	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	6
2.1 Kondisi Geologis Desa Parangtritis.....	6
2.2 Kondisi Geohidrologi Desa Parangtritis.....	7
2.3 Timbal.....	9
2.3.1 Dampak Kesehatan Manusia.....	9
2.3.2 Dampak Terhadap Ekosistem.....	10

2.3.3 Sumber Timbal Secara Geogenik.....	11
2.3.4 Peran Timbal pada Kegiatan Pertanian	12
2.4 Kegiatan Pertanian di Desa Parangtritis.....	13
2.5 Indeks Saturasi (SI)	14
2.6 <i>Enrichment Factor</i>	15
2.7 <i>Geoaccumulation Index</i>	16
2.8 <i>Geochemical Background Value</i>	16
2.9 Penelitian Sebelumnya	17
BAB III METODE PENELITIAN.....	24
3.1 Tahapan Penelitian	24
3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian.....	25
3.3 Metode Pengambilan Sampel.....	25
3.4 Alat dan Bahan	29
3.5 Prosedur Analisis Data	30
3.5.1 Indeks Saturasi	30
3.5.2 <i>Enrichment Factor</i>	31
3.5.3 <i>Geoaccumulation Index</i>	32
3.5.4 Analisis Kualitas Tanah Berdasarkan Kadar Pb di Kedalaman Tanah yang Berbeda	33
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	34
4.1 Kondisi Eksisting	34
4.1.1 Air Tanah	34
4.1.2 Tanah	36
4.2 Analisis Sampel.....	39
4.2.1 Analisis air tanah	39

4.2.2 Analisis Tanah	40
4.2.2.1 Nilai pH.....	40
4.2.2.2 Kandungan Timbal	41
4.2.2.3 Kadar Besi	44
4.3 <i>Natural Background Value</i> (BGV).....	45
4.4 Analisis Berdasarkan Kandungan Timbal pada Lapisan Atas dan Bawah	48
4.5 <i>Enrichment Factor</i> (EF).....	49
4.6 <i>Geoaccumulation Index</i> (Igeo).....	51
4.7 Indeks Saturasi (SI)	53
4.8 Paparan Kandungan Timbal oleh Kegiatan Pertanian.....	54
4.9 Hubungan Kontaminasi Tanah dan Pencemaran Air tanah	55
4.10 Sumber Potensial Lain Pencemaran Akuifer.....	57
4.11 Pengaruh mineral CaCO_3 terhadap kandungan timbal pada akuifer.....	59
4.12 Teknologi Remediasi Kontaminasi Timbal pada Tanah Pertanian.....	60
4.13 Pencemaran timbal pada tanah dan air tanah Negara Jerman	62
BAB V PENUTUP	67
5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran.....	68
DAFTAR PUSTAKA	69
LAMPIRAN	81

DAFTAR NOTASI

SSA = Spektrofotometri Serapan Atom

EF = *Enrichment Factor*

I_{geo} = *Geaccumulation Index*

SI = Indeks Saturasi

BGV = *Natural Backgroundvalue*

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Produksi dan luas panen komoditas pertanian dan perkebunan Kecamatan Kretek.....	13
Tabel 2.2 Penelitian sebelumnya.....	18
Tabel 3.1 Ringkasan Pengambilan Sampel Tanah & Kontrol.....	27
Tabel 3.2 Koordinat Pengambilan Sampel Air Tanah	28
Tabel 3.3 Klasifikasi Nilai EF	32
Tabel 4.1 Vegetasi Lokasi Pengambilan Sampel Tanah	37
Tabel 4.2 Hasil Pengujian Kadar Sulfida Air Tanah	39
Tabel 4.3 Hasil Analisis pH Tanah (Diukur dalam larutan kalsiumklorida)	40
Tabel 4.4 Hasil Pengujian Kandungan Timbal.....	42
Tabel 4.5 Kandungan Besi Pada Wilayah Penelitian	44
Tabel 4.6 Kandungan Besi Pada Lokasi Kontrol	46
Tabel 4.7 Kandungan Timbal Pada Sampel Kontrol.....	47
Tabel 4.8 Hasil Perhitungan EF	50
Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Igeo	52
Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Indeks Saturasi.....	53
Tabel 4.11 Dosis Pemakaian Pupuk Urea	54

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Kerangka pikir penelitian	3
Gambar 2.1 Peta geologis Desa Parangtritis (Sumber: Wilopo et al., 2021)	7
Gambar 3.1 Diagram alir tahapan penelitian	24
Gambar 3.2 Lokasi Daerah Penelitian	25
Gambar 3.3 Lokasi Pengambilan Sampel Tanah & Kontrol.....	27
Gambar 3.4 Lokasi Sampling Air Tanah.....	29
Gambar 4.1 Hasil Interpolasi Tinggi Muka Air Tanah.....	35
Gambar 4.2 Penyebaran Timbal pada Air Tanah.....	36
Gambar 4.3 Foto Sampel Tanah.....	38
Gambar 4.4 Sampel Tanah Kontrol.....	39
Gambar 4.5 Hasil Interpolasi Kadar Timbal Lapisan Atas	43
Gambar 4.6 Hasil Interpolasi Kadar Timbal Lapisan Tanah Bawah.....	44
Gambar 4.7 Grafik Kandungan Timbal Lapisan Tanah Atas dan Bawah	48
Gambar 4.8 Grafik Hasil Perhitungan EF	51
Gambar 4.9 Hasil Perhitungan Igeo	53

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 : Foto Pengambilan Sampel
- Lampiran 2 : Foto Uji Laboratorium
- Lampiran 3 : Kurva Kalibrasi Pengujian Sulfida
- Lampiran 4 : Hasil SSA

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Daerah yang dipilih untuk melakukan penelitian merupakan Desa Parangtritis yang terletak di Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Desa Parangtritis memiliki luasan sebesar 967 ha, dengan jumlah penduduk sebanyak 7.901 jiwa) (Andarwanto, 2020). Wilayah Desa Parangtritis merupakan daerah pesisir yang terletak di samping Samudera Hindia (Wilopo et al., 2021a). Desa Parangtritis menjadi destinasi wisata pantai yang populer, pada tahun 2022 Pantai Parangtritis dikunjungi oleh 1.838.200 pengunjung (Badan Pusat Statistik Kabupaten Bantul, 2023). Desa Parangtritis memiliki daerah pertanian yang terdiri dari sawah dengan luas sebesar 167 ha dan ladang tanah kering dengan luasan sebesar 287,3 ha (Andarwanto, 2020). Daerah penelitian ini memiliki kegiatan pertanian yang meliputi pertanian bawang merah, padi dan cabai merah. Hasil pertanian padi per tahunnya mencapai 8,5 ton per hektar. Sistem irigasi yang digunakan pada daerah pertanian tersebut adalah sistem pompa air tanah dangkal (Kalurahan Parangtritis, 2019).

Secara geologis, Desa Parangtritis terletak di atas 4 formasi geologis, yaitu Formasi Pengendapan Merapi Muda, Formasi Wonosari, Formasi Aluvium dan Formasi Nglanggran. Deposit batuan Merapi muda dan aluvium sebagian besar terdapat pada wilayah Desa Parangtritis pada daerah datar. Akuifer yang terdapat pada daerah Parangtritis sebagian utamanya bersifat *unconfined aquifer* dangkal, yang dibatasi oleh sungai Opak pada sisi barat, dan pada sisi timur dibatasi oleh pegunungan *karst* serta pada sisi selatan oleh laut. Air dalam akuifer Parangtritis mengalir dari utara menuju selatan (Wilopo et al., 2021b). Akuifer tersebut terdiri utamanya dari pasir sedang hingga halus dan pasir aluvial (Isa et al., 2022). Akuifer di Desa Parangtritis terdapat pada kedalaman di antara 0,2 meter sampai 9 meter (Nugroho et al., 2014).

Dari penelitian Sujatmiko (2009) dinyatakan bahwa, rata-rata setiap penduduk Desa Parangtritis memakai air tanah sebanyak 87,33 liter per hari. Selain itu, penelitian tersebut mengatakan bahwa 26% dari wisatawan menggunakan air tanah sebanyak 15 sampai 19,9 liter per hari dan 24% dari wisatawan menggunakan lebih dari 19,9 liter per hari. Pada tahun 2023, sekitar 2,2 juta wisatawan mengunjungi Pantai Parangtritis (Badan Pusat Statistik Kabupaten Bantul, 2023). Air tanah digunakan oleh fasilitas wisata seperti hotel, rumah makan dan fasilitas rekreasi lain (Isa et al., 2022). Air tanah pada daerah penelitian merupakan faktor penting untuk proses perkembangan pariwisata.. Selain itu air tanah akuifer juga digunakan untuk kegiatan pertanian di wilayah Desa Parangtritis, kegiatan tersebut memerlukan sebanyak 2.921 liter air tanah per hari (Sujatmiko, 2009).

Ditemukan bahwa akuifer di Desa Parangtritis telah tercemar oleh logam berat timbal. Dari 17 sampel air tanah yang diambil di Desa Parangtritis enam sampel melebihi nilai baku mutu untuk kandungan timbal. Dari enam sampel tersebut tiga sampel diambil pada daerah pertanian. Di wilayah pertanian ditemukan 3 dari 5 sampel yang tercemar logam berat timbal (Rezhandi, 2019). Sumber timbal dapat berasal dari kegiatan geogenik atau antropogenik (Ren et al., 2022). Sumber geogenik yang dapat mempengaruhi kandungan timbal pada tanah dan air tanah merupakan mineral-mineral yang mengandung timbal seperti *galena*, *cerussite* atau *anglesite* (National Academies of Sciences, 2017).

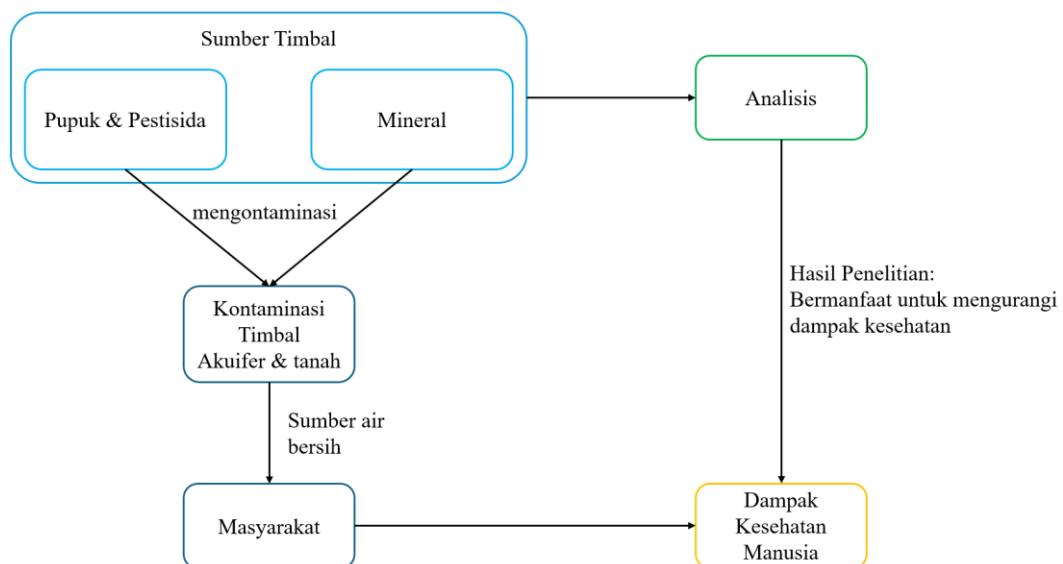
Timbal merupakan logam berat yang sangat beracun. Paparan timbal dapat berpengaruh terhadap sistem saraf manusia dan menyebabkan kelelahan, defisit motorik halus, sakit kepala dan gangguan emosional. Selain itu pemaparan timbal dapat meningkatkan risiko terkena penyakit jantung atau kematian akibat *stroke*. Timbal dapat berpengaruh negatif terhadap sistem reproduksi manusia dan dapat menyebabkan keguguran. Selain itu timbal merupakan karsinogenik dan dapat menyebabkan kanker. Terutama anak kecil bersifat rentan terhadap paparan timbal (Mohsin, 2022)

Pupuk dan pestisida yang digunakan pada kegiatan pertanian dapat menyebabkan pencemaran logam berat pada air tanah (Srivastav, 2020). Ditemukan bahwa tanah pertanian mengalami peningkatan kandungan timbal akibat

penggunaan pupuk anorganik (Ustiatik et al., 2024). Penelitian Dewi et al. (2022) menemukan bahwa semua sampel pupuk dan pestisida yang dianalisis mengandung kandungan timbal.

Timbal ditemukan pada pupuk dan pestisida yang digunakan dalam kegiatan pertanian di daerah penelitian. Oleh karena itu, dikembangkan hipotesis yang menyatakan bahwa penggunaan pupuk dan pestisida di daerah tersebut dapat menyebabkan pencemaran air tanah, seperti yang ditemukan oleh Rezhandi (2019), serta berpotensi menyebabkan kontaminasi tanah. Hal ini didukung oleh keadaan akuifer yang dangkal yang memudahkan transportasi logam berat seperti timbal ke dalam akuifer.

Sebagai penelitian dasar, hasil penelitian bermanfaat untuk proses evaluasi dampak kontaminasi, membantu mengembangkan kebijakan penggunaan pupuk yang lestari, perencanaan kegiatan mitigasi dan remediasi, dapat menginformasikan masyarakat terkait kandungan timbal dalam air tanah yang terpakai sehari-hari serta dapat menjadi dasar pembentukan kesadaran petani atas dampak pemakaian pupuk kimia dan pestisida. Kerangka pikir yang diterapkan pada penelitian ini terlihat pada Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Alur penelitian

1.2 Rumusan Masalah

Pada penelitian ini perumusan masalah adalah berikut:

- 1) Apa sumber pencemar logam berat timbal pada daerah penelitian?
- 2) Apakah penggunaan pupuk dan pestisida merupakan sebab pencemaran timbal pada air tanah di akuifer wilayah Desa Parangtritis?
- 3) Apakah kondisi geologis dapat berpengaruh terhadap kadar timbal pada tanah maupun air tanah di daerah penelitian?
- 4) Apakah terdapat pencemaran timbal pada tanah di daerah penelitian?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

- 1) Menganalisis pengaruh pemakaian pupuk dan pestisida terhadap kontaminasi timbal pada tanah dan air tanah menggunakan analisis geokimia.
- 2) Menganalisis pengaruh kondisi geologis terhadap pencemaran timbal pada air tanah di daerah penelitian.
- 3) Menentukan kadar timbal pada tanah di daerah penelitian.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah:

- 1) Hasil penelitian ini dapat mengidentifikasi sumber pencemaran air tanah oleh timbal pada daerah penelitian.
- 2) Hasil penelitian dapat digunakan untuk mengevaluasi dampak penggunaan pupuk kimia dan pestisida pada daerah pertanian Desa Parangtritis.
- 3) Hasil penelitian dapat membantu masyarakat dalam mengembangkan kebijakan dalam penggunaan pupuk kimia dan pestisida yang lestari.
- 4) Hasil penelitian dapat digunakan untuk mengembangkan kesadaran petani atas dampak penggunaan pupuk kimia yang mengandung timbal.
- 5) Hasil penelitian dapat membantu pada perencanaan mitigasi dan remediasi, kontaminasi timbal pada air tanah.

- 6) Hasil penelitian ini meningkatkan ilmu pengetahuan terkait kontaminasi timbal pada akuifer daerah penelitian dan terkait proses transpor timbal pada air tanah.

1.5 Ruang Lingkup

Ruang lingkup penelitian ini adalah:

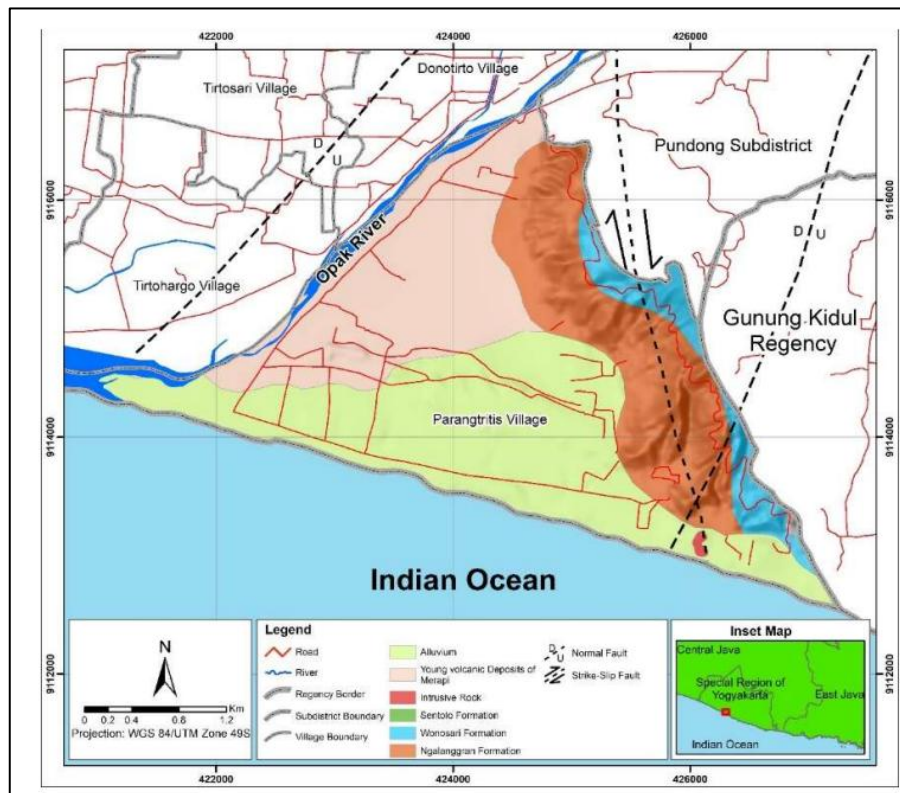
- 1) Daerah penelitian merupakan daerah pertanian di Desa Parangtritis, Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta.
- 2) Parameter penentu kualitas air tanah yang digunakan pada penelitian ini merupakan parameter logam berat timbal.
- 3) Kadar timbal pada tanah ditentukan dengan menggunakan Spektrofotometri Serapan Atom.
- 4) Untuk penentuan indeks saturasi model PHREEQC digunakan.
- 5) 5 sampel air tanah diambil pada 5 lokasi yang dipilih secara sistematis.
- 6) 10 sampel tanah diambil pada 5 lokasi yang dipilih secara sistematis.
- 7) Pada penelitian ini hanya besi digunakan sebagai logam pembanding.
- 8) Faktor yang diabaikan merupakan kegiatan manusia yang bukan pertanian, kondisi, meteorologi dan iklim, interaksi mikroba dengan timbal serta interaksi kandungan bahan organik dengan timbal pada tanah dan air tanah.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kondisi Geologis Desa Parangtritis

Pada Gambar 2.1, terlihat formasi geologis di Desa Parangtritis yang terdiri dari empat formasi geologi. Formasi pertama merupakan Formasi Aluvial yang terdapat pada bagian tengah wilayah Parangtritis. Formasi Aluvial ini utamanya terdiri atas kerikil, pasir, lanau dan lempung. Formasi aluvial terbentuk oleh aliran sungai Opak yang berhulu di Gunung Merapi dan bergabung setelahnya dengan Sungai Oyo yang berhulu di batuan gamping. Formasi Merapi Muda merupakan hasil ekstrusi lava di Parangkusumo. Pada bagian wilayah Parangtritis timur yang berupa perbukitan terdapat Formasi Wonosari dan Formasi Nglanggran. Formasi Nglanggran terdiri dari batuan breksi dan Formasi Wonosari terdiri dari batuan batu gamping. Di wilayah bagian selatan terdapat wilayah pesisir yang berbentuk gumuk pasir serta pantai. Wilayah ini merupakan wilayah pesisir tipe primer yang dipengaruhi oleh fluvial, marin dan aeolian (Wahyuningsi, et al., 2016).



Gambar 2.1 Peta geologis Desa Parangtritis (Sumber: Wilopo et al., 2021)

2.2 Kondisi Geohidrologi Desa Parangtritis

Pada Akuifer Parangtritis karakteristik kualitas air untuk parameter kekeruhan, daya hantar listrik (DHL) dan pH memenuhi persyaratan kualitas air tanah yang berlaku. Kualitas air akuifer Parangtritis belum dipengaruhi oleh terjadinya intrusi air laut (Murtianto et al., 2017)

Penelitian Antika et al. (2024) menguji kualitas air tanah di Desa Parangtritis terhadap parameter bau, warna, nitrat, nitrit dan E. Coli. Penemuan dari peneliti adalah bahwa air tanah tidak berwarna dan berbau pada zona permukiman dan peternakan. Hanya pada kolam *aquaculture*, zonasi pertanian serta zonasi wisata ditemukan sampel air tanah yang berwarna dan berbau. Terutama pada wilayah wisata ditemukan bahwa sebagian besar dari sampel air tanah berbau dan berwarna. Pada wilayah permukiman dan peternakan terdapat dua sampel serta pada wilayah wisata terdapat satu sampel air tanah dengan kandungan nitrat yang melebihi baku mutu. Untuk parameter nitrit semua sampel menunjukkan di bawah

ambang batas kualitas air minum. Untuk parameter E. Coli, semua sampel menunjukkan terjadinya pencemaran secara biologis, karena semua sampel air tanah melebihi nilai ambang batas baku mutu air tanah untuk parameter E. Coli. Sampel air tanah yang diambil di wilayah pertanian menunjukkan kandungan E. Coli yang tertinggi (Antika et al., 2024).

Berdasarkan kandungan logam berat yang telah diuji di akuifer Desa Parangtritis, timbal adalah jenis logam berat yang menyebabkan kontaminasi air tanah yang paling signifikan dibandingkan dengan logam berat kadmium, kromium dan tembaga. Pada penelitian Rezhandi (2019) ditemukan bahwa 6 dari 15 total sampel air tanah kandungan timbal melebihi baku mutu. Terutama pada daerah pertanian, tiga dari lima sampel memiliki kandungan timbal di atas baku mutu yang memiliki ambang batas sebesar 0,03 mg/L untuk parameter timbal. Kadar timbal yang ditemukan pada air tanah wilayah pertanian mengandung 0,027 sampai 0,040 mg/L timbal.

Penelitian Akuifer Parangtritis terutama merupakan sebuah akuifer *unconfined* yang bersifat dangkal. Akuifer Parangtritis merupakan akuifer efluen yang mempengaruhi aliran air Sungai Opak. Arah aliran air dalam akuifer adalah dari utara menuju selatan (Wilopo et al., 2021).

Akuifer yang terdapat pada Desa Parangtritis bisa terbagi dua lapisan yaitu lapisan akuifer dan lapisan aquitard. Akuifer terdiri terutama dari pasir aluvial dan lapisan aquitard terdiri dari lempung aluvial. Akuifer pada wilayah dataran aluvial terdapat pada kedalaman 10 sampai 127 meter dengan ketebalan lapisan di antara 40 sampai 110 meter. Lapisan aquitard dapat dijumpai pada ketebalan nol sampai 36 meter. Lapisan aquitard tersebut bersifat tipis. Daerah gumuk pasir dan pantai, akuifer terdiri dari pasir aluvial serta batuan pasir. Lapisan batuan pasir ditemukan pada kedalaman 29 sampai 120 meter dengan ketebalan akuifer diantara 44 dan 91 meter. Sedangkan, lapisan pasir aluvial terdapat pada kedalaman 1 sampai 180 meter dan memiliki ketebalan sampai 179 meter. Wilayah gumuk pasir dan pantai memiliki potensi air tanah yang terbesar dengan *safe yield* sebesar 3.498.300 m³/tahun. Wilayah dengan potensi air tanah terbesar kedua merupakan dataran *fluvio marine* dengan *safe yield* sebesar 1.566.300 m³/tahun. Wilayah

akuifer Parangtritis dengan potensi akuifer terkecil merupakan dataran aluvial dengan potensi air tanah sebesar 580.750 m³/tahun. Penggunaan air tanah di seluruh Wilayah Parangtritis masih dibawah *safe yield* air tanah (Isa et al., 2022).

Pada penelitian Adji et al. (2014) terdapat bahwa kedalaman air tanah akuifer Desa Parangtritis dapat dijumpai pada kedalaman 0,2 sampai 9,5 meter. Sebagian besar (51,4 %) dari akuifer dapat dijumpai pada kedalaman 2 sampai 4 meter. Pada bagian dataran aluvial sebagian besar dari akuifer dapat dijumpai pada kedalaman lebih dari empat meter. Secara garis besar (57 % dari luasan total) akuifer Parangtritis merupakan tipis dengan ketebalan kurang dari 30 meter. Pada bagian dataran aluvial sebagian besar dari akuifer memiliki ketebalan akuifer di antara 30 dan 60 meter. Pada pengukuran DHL ditemukan bahwa sebagian besar dari bagian dataran aluvial memiliki nilai DHL yang sedang dengan 500 sampai 1000 μ mh/cm. Hal itu identifikasi sebuah pencemaran kategori sedang air tanah, pada bagian dataran aluvial (Adjia et al., 2019).

2.3 Timbal

Timbal merupakan logam berat yang secara alami berada di kerak bumi. Secara alamiah timbal ditemukan dalam mineral yang merupakan gabungan unsur timbal dengan unsur lain. Timbal seperti logam berat lain bersifat *non-biodegradable*. Timbal biasanya digunakan yakni pada proses pembuatan perahu dan bangunan, industri baterai timbal, industri otomotif, industri keramik, industri cat serta industri peluru (Collin et al., 2022). Timbal dapat berada dalam tiga kondisi oksidasi, yaitu Pb, Pb²⁺ dan Pb⁴⁺. Timbal lebih sering ditemukan dalam kondisi oksidasi Pb²⁺ dan Pb⁴⁺ daripada Pb. Timbal memiliki titik leleh yang lebih rendah daripada banyak logam yang lain. Timbal merupakan logam yang tidak mudah mengalami korosi (Mohsin, 2022).

2.3.1 Dampak Kesehatan Manusia

Timbal merupakan racun terhadap sistem saraf manusia. Gejala dari pemaparan timbal berupa kelelahan, defisit motorik kasar maupun halus,

degenerasi saraf, gangguan emosional, penurunan fungsi kognitif, depresi dan gangguan sistem saraf yang lain. Selain itu paparan timbal dapat memberi pengaruh negatif terhadap sistem kardiovaskular karena berpotensi untuk menyebabkan penyakit jantung serta dapat menyebabkan kematian akibat stroke. Pada tingkat kadar timbal darah di atas 60 $\mu\text{g}/100\text{mL}$, kandungan timbal tersebut dapat menyebabkan gangguan sistem imun. Gangguan sistem imun tersebut membuat tubuh host lebih rentan terhadap penyakit menular. Paparan timbal juga dapat menyebabkan hipertensi. Paparan timbal pada ibu yang hamil meningkatkan risiko terjadinya kelahiran prematur bahkan keguguran. Kandungan timbal di tubuh ibunya dapat dipaparkan pada fetus yang belum dilahirkan. Jika terjadi paparan timbal pada fetus, maka sistem saraf fetus ini dapat mengalami gangguan. Dalam tubuh manusia, timbal diakumulasi dalam tulang bersama natrium. Jika tubuh membutuhkan natrium, maka timbal dapat dilepaskan bersama natrium ke sistem darah manusia. Terutama pada anak kecil yang sangat rentan terhadap paparan timbal (Mohsin, 2022). Paparan timbal pada jangka waktu yang panjang dapat menyebabkan kerusakan ginjal maupun otak manusia. Dalam tubuh manusia, timbal bersifat sebagai kalsium-analog yang menyebabkan absorpsi timbal yang lebih tinggi oleh tubuh yang mengalami kekurangan kalsium, besi dan seng. Paparan timbal dapat menyebabkan penurunan kesuburan laki-laki maupun perempuan. Timbal juga bersifat karsinogenik yang dapat menyebabkan kanker (Collin et al., 2022).

2.3.2 Dampak Terhadap Ekosistem

Timbal ditemukan dalam bentuk organik maupun anorganik. Terutama timbal dalam bentuk organik bersifat sangat beracun untuk semua organisme, meskipun terdapat pada konsentrasi yang sangat kecil. Timbal juga bersifat *non-biodegradable* dan cenderung susah untuk dihilangkan dari sebuah ekosistem. Timbal dapat merusak ekosistem lautan maupun ekosistem daratan. Timbal dalam keadaan *soluble* dapat diserap oleh tanaman. Solubilitas timbal dapat dipengaruhi oleh nilai pH dan aktivitas mikroorganisme di lingkungan. Pada pH dibawah 6, timbal bersifat soluble dalam air dan jika terdapat pH di atas 7, maka timbal

cenderung untuk membentuk sebuah kompleks dengan anion OH^- (Raj & Das, 2023). Paparan timbal pada tanaman dapat menyebabkan stres oksidasi, kerusakan seluler dan mengganggu keseimbangan ion sel tanaman. Tanaman dapat menyerap kandungan timbal. Jika timbal diserap oleh tanaman, maka timbal tersebut disimpan pada akar tanaman. Penyerapan kandungan timbal dapat mengganggu beberapa proses dalam tanaman seperti efisiensi fotosintesis atau germinasi biji tanaman. Kandungan timbal mengurangi potensi fotosintesis tanaman dengan mengganggu proses pembuatan klorofil. Serta kandungan timbal mengurangi keberhasilan proses germinasi biji tanaman dengan mengganggu proses enzimatik. Tanaman yang terkena paparan timbal tumbuh lebih lambat dan menghasilkan daun dalam jumlah yang lebih kecil serta menghasilkan lebih sedikit biomassa (Collin et al., 2022). Pada penelitian (Sun et al., 2019) ditemukan bahwa pencemaran timbal mengurangi jumlah dan aktivitas mikroorganisme dalam tanah. Pencemaran timbal tersebut juga dapat menurunkan keanekaragaman mikroorganisme. Biomassa total dari mikroorganisme menurun akibat pencemaran timbal pada tanah. Kandungan timbal pada tanah mempersulit proses penyerapan sumber C (karbon) oleh mikroorganisme.

2.3.3 Sumber Timbal Secara Geogenik

Timbal adalah logam berat yang tersebar luas di kerak bumi dan berada dalam konsentrasi yang sangat kecil di semua batuan, sedimen bahkan air. Timbal dapat bergerak melalui atmosfer maupun melalui air. Pada proses transpor timbal, unsur timbal diadsorpsi oleh butiran tanah kecil yang kemudian dipindahkan oleh air atau udara. Penyebaran logam timbal tidak rata, oleh karena itu pada beberapa tempat di kerak bumi, terdapat kandungan timbal yang lebih besar daripada di tempat lain. Perbedaan konsentrasi timbal pada kerak bumi disebabkan oleh bermacam proses geologis. Beberapa kegiatan alamiah yang dapat menyebabkan dispersi dan akumulasi timbal secara signifikan yaitu letusan gunung merapi, kebakaran hutan dan erosi lahan. Secara keseluruhan terdapat sebanyak 400 jenis mineral yang mengandung unsur timbal. Tiga mineral timbal yang paling umum ditemukan merupakan mineral galena (PbS), kersite (PbCO_3) dan anglesit

(PbSO_4) (*National Academies of Sciences*, 2017). Kandungan timbal terdapat pada tanah akibat proses pelapukan batuan induk yang mengandung mineral timbal (Raj & Das, 2023).

2.3.4 Peran Timbal pada Kegiatan Pertanian

Kandungan timbal terdapat pada pupuk dan pestisida yang digunakan pada pertanian bawang merah di Indonesia. Pada penelitian Dewi et al. (2022) ditemukan kandungan timbal dalam seluruh sampel pestisida yang diteliti. Diantaranya terdapat 6 sampel insektisida, 4 sampel fungisida dan satu sampel herbisida yang mengandung timbal. Kandungan timbal yang ditemukan adalah di antara 2,70 dan 22,31 mg timbal per kilogram pestisida. Selain itu, semua sampel yang dianalisis, mengandung pupuk. Kandungan timbal pada pupuk berkisaran antara 10,53 sampai 28,09 mg/kg. Pada penelitian tersebut, kandungan timbal pada tanah dan bawang merah belum dianggap sebagai pencemaran. Pada penelitian Prasetyawati et al. (2021) ditemukan bahwa sampel pupuk NPK di Indonesia mengandung logam berat timbal. Kandungan yang ditentukan merupakan sebesar 10,77 mg/kg. Penelitian tersebut juga menemukan bahwa penambahan pupuk NPK meningkatkan kandungan timbal pada tanah (Prasetyawati et al., 2021).

2.3.5 Bentuk Timbal di Lingkungan dan Toksisitasnya

Timbal dalam bentuk organik bersifat lebih beracun daripada timbal dalam bentuk anorganik. Timbal organik lebih mudah diterima oleh otak manusia daripada timbal anorganik, maka timbal organik dapat menyebabkan gejala neurologis lebih cepat dan dengan dosis yang lebih kecil. Timbal organik bersifat lipofilik yang memungkinkan masukannya dengan mudah ke sel otak. Timbal organik dapat menyebabkan gejala neurologis seperti delirium, halusinasi serta kematian secara akut. Sedangkan timbal anorganik berdampak pada sistem saraf sentral dan dapat akumulasi pada tulang, hati dan ginjal manusia. Meskipun timbal anorganik memiliki tingkat keracunan lebih rendah daripada timbal organik, timbal anorganik cenderung untuk memiliki tingkat berakumulasi dalam tubuh manusia lebih tinggi

(Verity, 1990). Timbal organik berasal dari penggunaan bahan bakar minyak serta dari bermacam aplikasi di industri. Timbal anorganik berasal terutama dari cat, baterai dan pipa air (Flora et al., 2012). Timbal anorganik paling sering ditemukan dalam bentuk Pb^{2+} . Timbal dalam bentuk tersebut merupakan bentuk yang paling berbahaya untuk kesehatan manusia karena dapat menggantikan ion lain yang bersifat bivalent dan penting untuk berlangsung proses dalam sel seperti ion Ca^{2+} , Fe^{2+} serta Zn^{2+} . Pb^{2+} dapat menyebabkan penyakit neurologis dan pemaparan pada anak dapat menyebabkan gangguan perkembangan dan pertumbuhan otak (F. Ahmad & Liu, 2020). Timbal organik yang paling signifikan merupakan *tetraethyllead* (TEL). TEL merupakan cairan transparan yang sangat beracun. Sejak tahun 1920 TEL ditambahkan ke bensin untuk meningkatkan efisiensi pembakaran pada mesin. Meskipun pada zaman ini, TEL tidak dicampurkan lagi bensin pada sebagian besar negara, tetap ada beberapa negara berkembang yang tetap mencampurkan TEL ke bahan bakar berminyak. TEL dapat masuk ke tubuh manusia melalui kulit, paru-paru dan secara gastrointestinal. Dalam tubuh TEL terutama menerang otak dan ginjal (Patočka, 2008). Timbal secara alamiah berbentuk anorganik dan dapat ditemukan dalam bermacam mineral. Mineral timbal yang paling sering ditemukan adalah mineral galena. Sedangkan timbal organik berasal dari kegiatan manusiawi. Timbal secara alamiah paling sering ditemukan dalam bentuk ion Pb^{2+} yang bersifat bentuk yang paling stabil. Jarang ditemukan timbal dalam bentuk Pb^{4+} (Ashkan, 2023).

2.4 Kegiatan Pertanian di Desa Parangtritis

Hasil pertanian dan perkebunan di Kecamatan Kretek yakni berupa bawang merah, cabai, mangga, pisang, kelapa, kakao dan lain-lain. Produksi hasil pertanian dan luas wilayah panen untuk beberapa komoditas pertanian dan perkebunan di Kecamatan Kretek dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Produksi dan luas panen komoditas pertanian dan perkebunan
Kecamatan Kretek

No.	Komoditas	Luas panen (ha)	Produksi (Kuintal)
1	Bawang mmerah	816	108.658

2	Cabai besar	318	20.521
3	Cabai rawit	2	15
4	Mangga	N/D	7.902
5	Jeruk siam	N/D	3
6	Pisang	N/D	502
7	Pepaya	N/D	214
8	Kelapa	556,25	4.936,8
9	Kakao	1,3	2,7

N/D = *No Data*

(Sumber: Badan Pusat Statistik Kabupaten Bantul, 2023)

Pada Desa Parangtritis pola pertanian yang dilakukan oleh masyarakat adalah menanam padi, bawang merah dan cabai secara bergantian pada kurun waktu setahun. Padi hanya dapat dipanen satu kali setahun. Bawang merah dan cabai dapat ditanam dan dipanen dua kali setahun (Wahyuningsih et al., 2016). Luasan sawah yang terdapat pada daerah penelitian adalah sebesar 167 ha dan luasan ladang tanah kering adalah sebesar 287,3 ha. (Andarwanto, 2020) Sistem irigasi yang utama digunakan pada kegiatan pertanian di Desa Parangtritis merupakan pompanisasi air tanah dangkal (Kalurahan Parangtritis, 2019).

2.5 Indeks Saturasi (SI)

Indeks saturasi merupakan indeks yang dapat digunakan untuk memprediksi keberadaan mineral yang reaktif. Indeks tersebut menentukan apakah sebuah mineral bersifat *oversaturated*, *saturated* dan *undersaturated* dalam air. Rumus yang digunakan pada perhitungan Indeks Saturasi adalah berikut:

$$SI = \log \left(\frac{AIP}{K} \right)$$

AIP (*ion activity product*) merupakan hasil analisis kima air. K adalah konstanta hasil kali kelarutan (*solubility product constant*) yang menggambarkan keadaan ion-ion pada kondisi kesetimbangan. Indeks Saturasi (SI) menunjukkan rasio antara AIP dan K dalam skala logaritmik. Jika SI kurang dari 0, maka air

berada dalam kondisi *undersaturated* terhadap mineral tertentu. Jika SI lebih dari 0, maka air berada dalam kondisi *oversaturated* terhadap mineral tertentu. SI merupakan sebuah indikator untuk menentukan proses yang terjadi di antara sebuah mineral dan air. Jika air dalam keadaan *oversaturated*, maka mineral cenderung untuk mengendap dari air dan jika air dalam keadaan *undersaturated*, maka mineral cenderung untuk melarut dalam air (Appelo & Postma, 2005).

2.6 Enrichment Factor

Rumus faktor ini digunakan untuk mengevaluasi tingkat kontaminasi pada tanah serta sebagai indikator apakah sumber kontaminasi adalah geogenik atau antropogenik. *Enrichment Factor* (EF) merupakan teknik normalisasi dimana nilai unsur yang diteliti dibandingkan dengan unsur referensi. Unsur referensi yang digunakan merupakan unsur yang tidak dipengaruhi oleh faktor antropogenik. Unsur yang dapat digunakan sebagai unsur referensi adalah aluminium, besi, mangan, silika atau titanium. Rumus perhitungan *Enrichment Factor* adalah berikut:

$$EF = \frac{(C_n/C_{ref})_{sample}}{(B_n/B_{ref})_{background}}$$

C_n merupakan konsentrasi unsur penelitian yang diuji dan C_{ref} adalah konsentrasi unsur referensi yang ditemukan pada tanah yang dianalisis. B_n merupakan *background value* untuk unsur yang diteliti dan B_{ref} adalah nilai *background value* untuk unsur referensi. Nilai EF di bawah satu mengindikasikan bahwa kontaminasi oleh unsur penelitian berdasarkan faktor geogenik. Nilai EF di antara 1 dan 10 menyatakan sumber kontaminasi merupakan faktor geogenik dengan pengaruh kegiatan antropogenik. Nilai EF di atas 10 mengindikasikan bahwa kontaminasi oleh unsur penelitian disebabkan terutama dari kegiatan antropogenik (Soltani-Gerdefaramarzi et al., 2021). Besi merupakan logam yang cocok untuk digunakan sebagai unsur referensi karena memiliki sifat geokimia yang mirip dengan sebagian besar logam lain pada kondisi aerobik maupun anaerobik (Mandal et al., 2022).

2.7 Geoaccumulation Index

Geoaccumulation Index (Igeo) merupakan indikator untuk akumulasi logam atau unsur lain akibat kegiatan antropogenik.

Rumus Igeo adalah berikut:

$$I_{geo} = \log_2 \left(\frac{C_{sample}}{1,5 * C_{background}} \right)$$

C_{sample} merupakan konsentrasi logam berat yang ditemukan pada sampel tanah dan $C_{background}$ merupakan konsentrasi logam berat historis pada tanah yang belum dipengaruhi oleh kegiatan antropogenik (Soltani-Gerdefaramarzi et al., 2021). Faktor 1,5 digunakan untuk memperhatikan variasi geogenik logam berat pada tanah (Hizli et al., 2023). Igeo dapat digunakan untuk mengidentifikasi dampak kegiatan antropogenik yang minim terhadap kandungan logam pada tanah (Soltani-Gerdefaramarzi et al., 2021). Metode ini berdasarkan perbandingan kadar logam nyata dengan kadar logam sebelum masa industri. Nilai Igeo yang negatif menyatakan bahwa tanah belum mengalami pencemaran akibat kegiatan antropogenik. Semakin tinggi nilai Igeo, maka semakin berat kontaminasi yang terjadi akibat kegiatan manusia (Hizli et al., 2023).

2.8 Geochemical Background Value

Geochemical Background value (BGV) merupakan besarnya kandungan sebuah mineral pada tanah yang tidak dipengaruhi oleh kegiatan manusia. Kandungan tersebut diakibatkan oleh proses pelapukan material batuan induk. *Background Value* bertujuan sebagai nilai pembanding sehingga sumber kontaminasi logam berat yang antropogenik dapat diidentifikasi. Pada zaman ini sulit menentukan BGV karena sebagian besar dari tempat telah dipengaruhi oleh kegiatan manusia. Bahkan tempat yang masih tergolong alami telah mengalami kontaminasi akibat presipitasi kontaminan dari atmosfer. Sangat penting untuk menentukan BGV untuk setiap daerah karena kondisi geologis yang berbeda mempengaruhi besarnya nilai BGV. *Geochemical Background Value* dapat ditentukan menggunakan beberapa metode statistika (Kazapoe & Arhin, 2021).

Selain metode statistika *background value* dapat ditemukan dengan metode menggunakan nilai kandungan logam rata-rata pada kerak bumi. Metode ini tidak memperhatikan kondisi geologis lokal dan dianggap kurang teliti. Metode lain adalah bahwa *background value* diambil dari sampel tanah dengan tingkat kedalaman yang dalam, karena dianggap kedalaman tersebut belum mengalami pengaruh oleh kontaminasi antropogenik. Metode ini tidak memperhatikan komposisi tanah yang berbeda pada lapisan tanah yang berbeda. Di Australia ditemukan bahwa *background value* untuk logam berat sangat tergantung dari kondisi geologis dan bervariasi di antara wilayah (Reimann & de Caritat, 2017).

2.9 Penelitian Sebelumnya

Telah dilakukan beberapa penelitian yang memiliki hasil penelitian yang bermanfaat untuk penelitian ini. Penelitian tersebut mencakup penelitian terkait kualitas air daerah Parangtritis, kondisi geologis akuifer Parangtritis, serta analisis sumber pencemaran logam berat timbal. Hasil dan Metode penelitian yang dilakukan sebelumnya terlihat pada tabel 2.2.

Tabel 2.2 Penelitian sebelumnya

No.	Peneliti	Judul	Metode	Hasil
1.	Rezhandi 2019	Analisis Kualitas Air Tanah Berdasarkan Kandungan Logam Berat (Pb, Cu, Cr, Cd) Di Kawasan Gumuk Pasir, Bantul, Yogyakarta	Sampel air tanah di ambil pada 17 lokasi. Sampel tersebut dianalisis terhadap kandungan logam berat kadmium, tembaga, kromium dan timbal. Penyebaran kandungan logam berat diproyeksikan pada daerah penelitian menggunakan <i>software</i> QGIS.	Terdapat 6 sampel untuk parameter timbal, 5 sampel untuk parameter tembaga, satu sampel untuk parameter kromium dan satu sampel untuk parameter kadmium yang melebihi baku mutu yang berlaku. Kandungan timbal tertinggi yang ditemukan adalah sebesar 0,053mg/L. Untuk parameter timbal, tiga dari lima sampel yang diambil di daerah persawahan melebihi baku mutu kualitas air tanah. Dari proses pemetaan terdapat bahwa penyebaran logam berat didominasi oleh daerah pariwisata, kemudian diikuti oleh

				daerah persawahan dan permukiman.
2.	Murtianto et al., 2017	<i>The Study Of Water Quality For Developing Tourism In Parangtritis Coastal Area, Indonesia</i>	Sembilan sample air tanah diambil pada Desa Parangtritis menggunakan metode sampling <i>purposive random sampling</i> . Sampel air tanah diuji terhadap parameter fisik seperti DHL, warna, bau dan kekeruhan. Pengujian kimia kualitas air tanah meliputi parameter pH dan ion-ion utama di antara lain Ca^{2+} , SO_4^{2+} dan CO_3^- .	Hasil penelitian menyimpulkan bahwa kualitas air untuk sebagian besar parameter dan sample air tanah Desa Parangtritis dianggap baik. Selain itu, hasil penelitian menunjukkan bahwa kualitas air tanah di Desa Parangtritis belum dipengaruhi oleh air laut. Kandungan bikarbonat tinggi pada air tanah daerah tersebut.
3.	Wilopo et al., 2021	<i>Seawater intrusion assessment and prediction of sea-freshwater interface in Parangtritis coastal aquifer,</i>	Analisis pengaruh air laut terhadap kualitas air tanah Desa Parangtritis dilakukan menggunakan 16 sample air tanah. Parameter yang diuji merupakan DHL dan TDS. Berdasarkan metode simpson rasio, sodium klorida rasio serta nilai BEX diuji apakah terjadi intrusi air laut.	Air tanah terutama merupakan jenis air tanah bikarbonat. Air tanah daerah Parangtritis belum mengalami intrusi air laut. Akuifer tersebut merupakan dangkal dan air tanah mengalir dari utara menuju selatan. Pada akuifer ini, terdapat

		<i>South of Yogyakarta Special Province, Indonesia</i>		sumber air panas yang memiliki kandungan ion sangat tinggi.
4.	Adji et al., 2014	Identifikasi Potensi Airtanah pada Area dengan Beragam Bentuklahan Menggunakan Beberapa Parameter Lapangan dan Pendekatan SIG di Kawasan Parangtritis, DIY	Satuan tata guna lahan Desa Parangtritis ditentukan dari citra satelit Digital Landsat ETM ⁺ . Parameter kedalaman muka air tanah, ketebalan akuifer, dan DHL diukur secara langsung di lapangan. Hasil pengukuran paramter kemudian dianalisis menggunakan metode <i>overlay</i> di software GIS ArcGIS.	Hasil penelitian adalah bahwa sebagian besar (49,8%) berpotensi baik, 48,7% dari akuifer berpotensi sedang dan hanya 1,5% berpotensi kecil. Kedalaman permukaan air tanah terdapat pada kedalaman di antara 0,2m sampai 9,5m. Sebagian besar dari Desa Parangtritis (57%) memiliki akuifer yang bersifat tipis dengan kedalaman di antara 0m dan 30m. Hanya 10% Desa Parangtritis memiliki akuifer yang bersifat tebal dengan ketebalan di atas 60m. Pada wilayah daratan alluvial potensi air tanah terutama bersifat sedang.

5.	Prasetyawati et al., 2021	Kandungan Logam Pb Dan Cu Dalam Tanaman Bayam Dan Bioavailabilitasnya Dalam Tanah Pertanian Dengan Pemberian Pupuk NPK	Pada penelitian ini diuji dampak pemberian pupuk NPK untuk kadar timbal dan tembaga pada tanah dan tanaman bayam. Eksperimen yang dilaksanakan melibatkan pengujian kandungan timbal pada tanah, tanah yang diberikan pupuk, tanah yang ditanami bayam dan tanah yang diberikan pupuk serta ditanami bayam. Kadar timbal diuji dengan metode digesti asam dan pengukuran dengan SSA.	Pupuk NPK yang diuji mengandung timbal sebanyak 10,7 mg/kg. Penambahan pupuk NPK meningkatkan kandungan timbal di tanah. Pemberian pupuk NPK menambahkan kandungan timbal di tanah dari 431,9 mg/kg menjadi 442,8 mg/kg.
6.	Anggraeni et al., 2024	<i>Analysis of heavy metals (Pb and Cd) in soil layers of Indonesia: Spatial distribution, potential source, and groundwater effect</i>	Penelitian ini menganalisis 102 sample di 7 daerah di Kabupaten Bandung terhadap pencemaran timbal dan kadmium. Sample tanah diambil pada kedalaman tanah 20 cm, 60cm dan 100cm. Kandungan logam yang terdapat dianalisis menggunakan <i>contamination factor, ecological risk indeks, geoaccumulation index</i> dan analisis statistika.	Kandungan timbal yang ditemukan berkisaran di antara 0,01 dan 142,02 mg/kg. 3% dari sampel tanah melebihi baku mutu kandungan timbal di tanah. Secara rata-rata kandungan timbal yang terbesar ditemukan pada lapisan tanah yang terletak di tengah. Pada lokasi yang berdekatan dengan industri tekstil

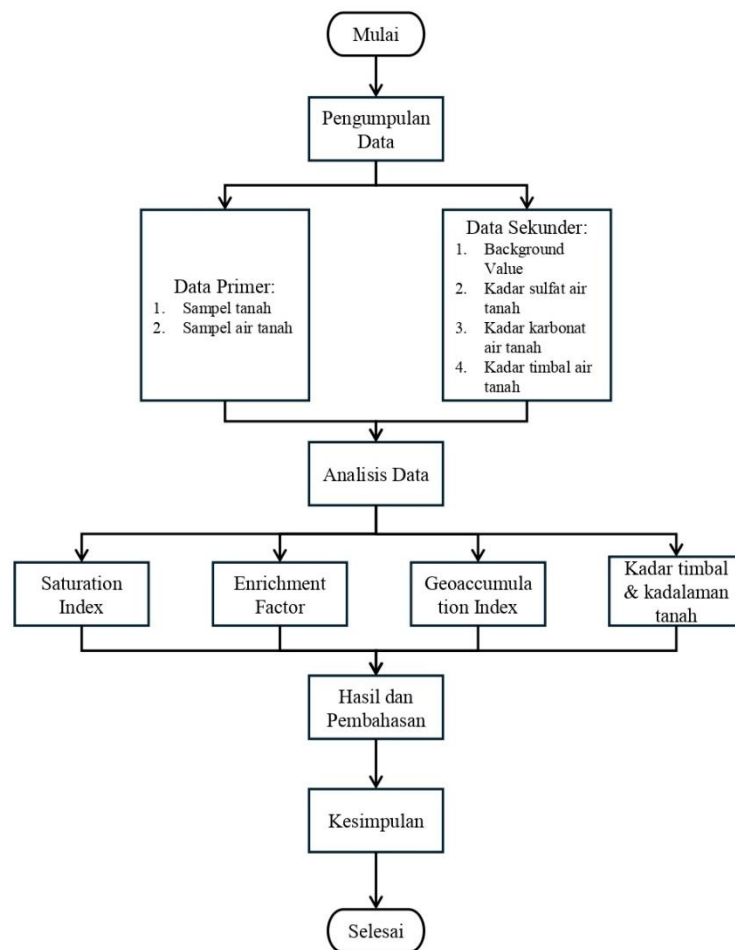
				terdapat kandungan timbal pada lapisan tanah yang terletak paling atas. Oleh karena itu dianggap industri tekstil merupakan salah satu sumber pencemaran timbal yang antropogenik. Kandungan timbal yang tinggi pada lapisan tengah dapat berasal dari akumulasi oleh kegiatan antropogenik yang dilakukan pada jangka waktu yang panjang seperti penggunaan pupuk dan pestisida. Konsentrasi timbal yang ditemukan pada air tanah berkisaran di antara 0 dan 0,26 mg/L. 18% dari sampel air tanah melebihi baku mutu kandungan timbal. Analisis statiska menunjukkan korelasi yang signifikan di antara kandungan kadmium dan timbal.
--	--	--	--	---

				Tidak terdapat korelasi signifikan di antara kandungan timbal di tanah dan kandungan timbal di air tanah. Faktor kontaminasi untuk logam timbal bersifat ringan untuk 68%, sedang untuk 26% dan 6% tinggi dari Daerah Penelitian. Nilai geoaccumulation indeks rata-rata untuk logam timbal adalah sebesar – 1,97. Hasil ini menunjukkan bahwa tanah secara garis besar tidak tercemar oleh timbal.
--	--	--	--	--

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

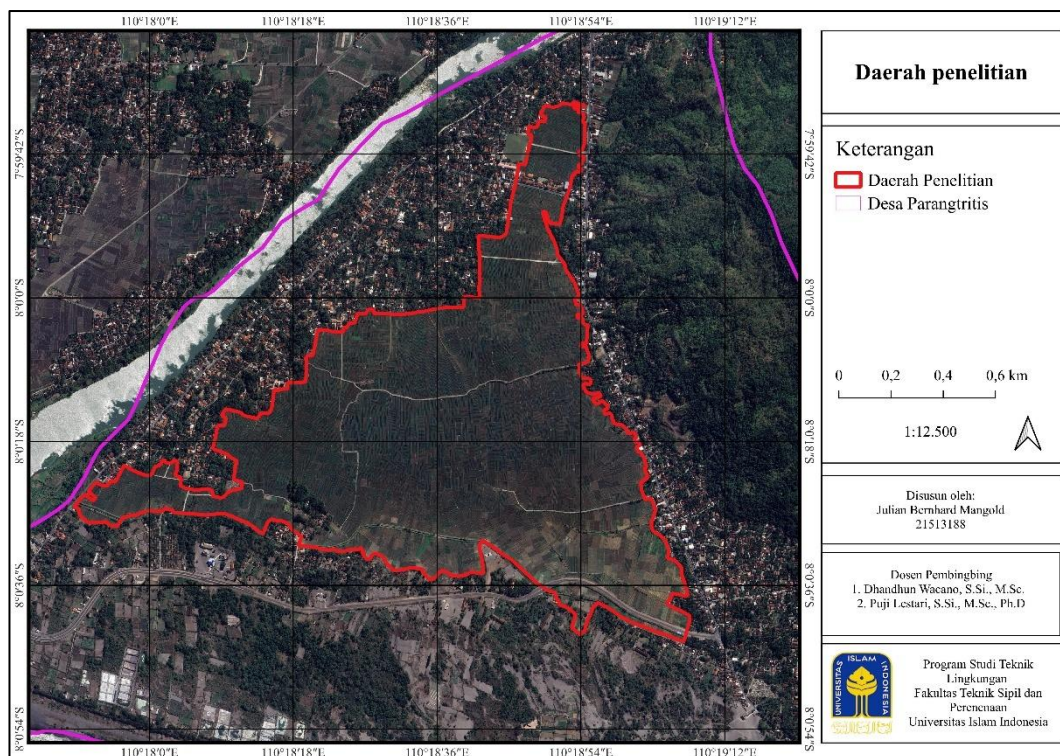
Diagram alir tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram alir tahapan penelitian

3.2 Waktu dan Lokasi Penelitian

Tugas Akhir dilaksanakan selama 4 bulan, yaitu dari bulan Oktober tahun 2024 sampai dengan bulan Januari tahun 2025. Daerah penelitian merupakan wilayah pertanian di Kelurahan Parangtritis, Kecamatan Kretek, Kabupaten Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. Batas wilayah penelitian mencakup 8°0'43" Lintang selatan, 110°19'5" lintang timur, 7°59'38" Lintang utara, dan 110°17'53" lintang barat. Wilayah pertanian tersebut memiliki luas lahan sebesar 173,4 ha. Daerah penelitian dapat terlihat pada Gambar 3.2. Pengujian laboratorium sampel tanah dan sampel air tanah dilaksanakan di Laboratorium Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.



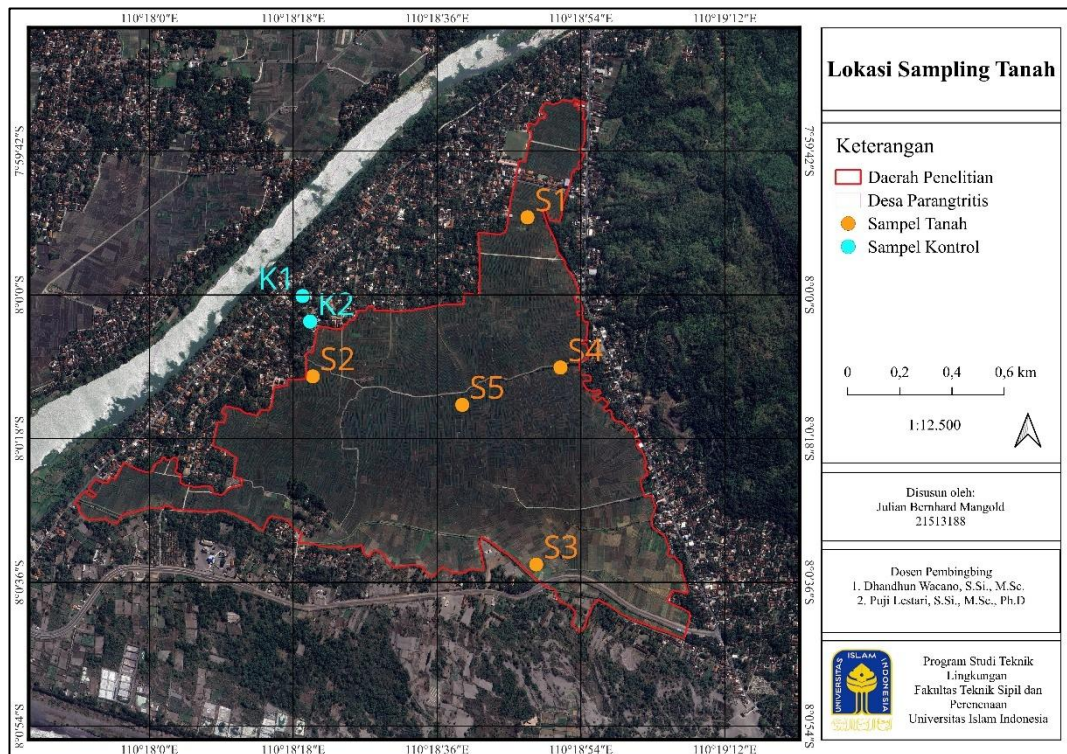
Gambar 3.2 Lokasi Daerah Penelitian

3.3 Metode Pengambilan Sampel

Kadar logam besi dan timbal diukur pada 10 sampel tanah. Sampel tersebut diambil pada lima lokasi sampling untuk 2 tingkat kedalaman tanah yang berbeda, yaitu kedalaman 20cm dan 65 sampai 75 cm. Selain sampel tanah, juga diambil kontrol sampel tanah sebanyak dua. Sebagai Lokasi sampel kontrol dipilih dua

halaman rumah warga karena warga menyatakan bahwa tidak dipakai pupuk kimia atau pestisida pada lokasi tersebut. Semua sampel tanah diambil di bulan Oktober pada akhir musim kemarau. Pada gambar 3.3 terlihat lokasi pengambilan sampel dan sampel kontrol tanah. Pada tabel 3.1 terdapat ringkasan terkait data pengambilan sampel tanah dan sampel tanah kontrol. Pada tabel tersebut D1 merupakan kedalaman sampel yang diambil pada lapisan atas dan D2 merupakan kedalaman sampel untuk lapisan bawah. Akibat tekstur tanah yang keras dan liat, peneliti mengalami kesusahan untuk mendapatkan kedalaman sampel yang sama untuk sampel tanah lapisan bawah.

Metode sampling yang digunakan merupakan *stratified random sample*. Metode ini dilakukan dengan pengambilan dua sampel tanah pada lima lokasi masing-masing. Lokasi sampel terletak pada bagian tengah, timur, utara, barat dan selatan daerah penelitian. Selain itu kontrol sampel tanah diambil pada dua lokasi di wilayah permukiman Desa Parangtritis. Proses pengambilan sampel tanah mengacu pada (International Atomic Energy Agency, 2004). Preparasi sampel tanah mengacu pada penelitian (Operacz et al., 2022). Setelah sampel tanah diambil, sampel dikeringkan di udara bebas hingga benar-benar kering. Kemudian, sampel dihaluskan menggunakan mortar dan disaring menggunakan saringan berpori 1mm. Setelah itu, sampel tanah dihaluskan kembali menggunakan mortar hingga butirannya berdiameter kurang lebih 0,1 mm. Setelah preparasi sampel, sampel disimpan pada kondisi kering hingga pengujian kadar timbal dilaksanakan. Pengujian kadar timbal dan besi sampel tanah dilakukan sesuai prosedur yang diterapkan oleh *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (2023). Metode ini berdasarkan pada proses destruksi sampel menggunakan larutan aquaregia hingga terbentuk larutan logam, yang konsentrasinya kemudian dapat diuji menggunakan Spektrometer Serapan Atom.



Gambar 3.3 Lokasi Pengambilan Sampel Tanah & Kontrol

Tabel 3.1 Ringkasan Pengambilan Sampel Tanah & Kontrol

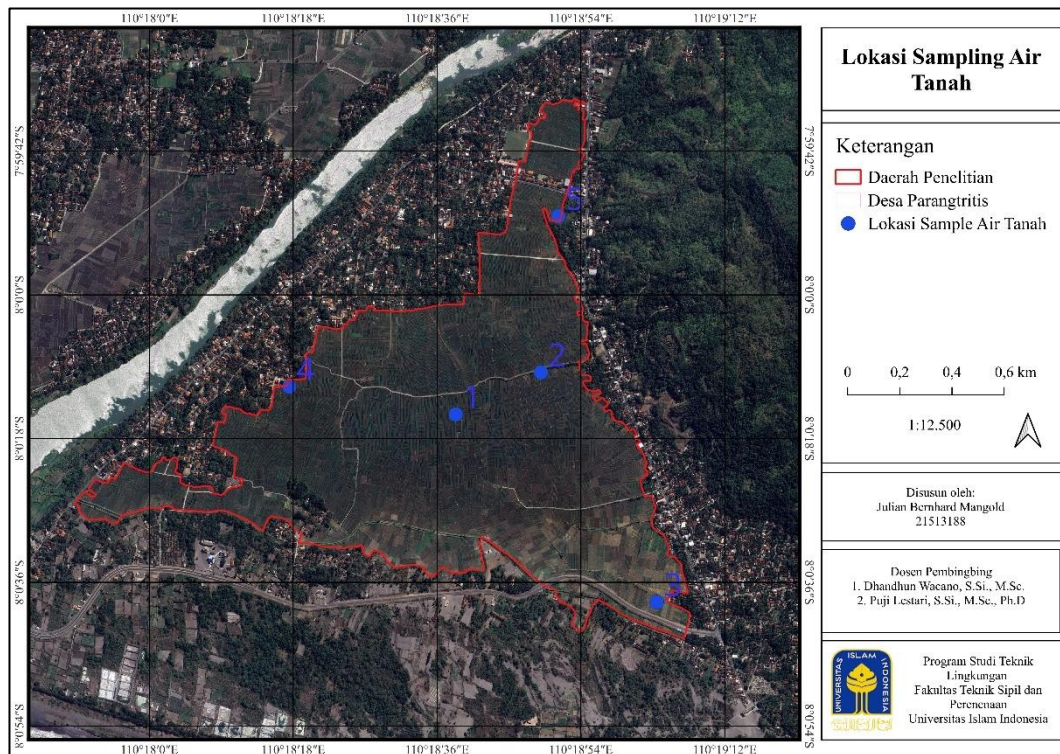
No.	D1 (cm)	D2 (cm)	Koordinat		Wilayah
			Lat (°)	Long (°)	
S1	20	73	-7,997305	110,313140	Utara
S2	20	72	-8,002837	110,305680	Barat
S3	20	69	-8,009377	110,313446	Selatan
S4	20	66	-8,002527	110,314290	Timur
S5	20	59	-8,003825	110,310876	Tengah
K1	20	68	-8,000041	110,305326	Desa
K2	20	67	-8,000927	110,305586	Desa

Kadar sulfida di air tanah diukur melalui lima sampel air tanah. Pengambilan sample air tanah menggunakan *stratified opportunistic sampling* yang diambil pada 5 lokasi yang terletak satunya di bagian tengah, timur, utara, barat dan selatan daerah penelitian. Lokasi titik sampling air tanah untuk parameter sulfida yang dilaksanakan pada penelitian ini dapat terlihat pada gambar 3.4. Koordinat pengambilan air tanah terdapat pada tabel 3.2. Pengambilan sampel

tanah dilakukan di bulan Oktober pada akhir musim kemarau. Sampel air tanah diambil pada sumur bor irigasi. Pengambilan sampel dilakukan dengan mengikuti prosedur yang diterapkan pada SNI 6989:58:2008 tentang metode pengambilan sampel air tanah (Badan Standardisasi Nasional, 2008). Setelah sampel diambil, sampel diawetkan dan diuji di laboratorium sesuai prosedur yang diterapkan pada SNI 6989.70:2009 tentang Air dan air limbah – Bagian 70: Cara uji sulfida biru metilen secara spektrofotometri (Badan Standardisasi Nasional, 2009). Satu sampel kontrol di mana aquades dituangkan ke dalam botol sampling pada daerah penelitian. Sampel kontrol tersebut diawetkan dan dianalisis dengan cara yang sama seperti sampel air tanah yang lain.

Tabel 3.2 Koordinat Pengambilan Sampel Air Tanah

Kode Sampel	Wilayah	Koordinat	
		Lat	Long
1	Tengah	-8,004155°	110,310647°
2	Timur	-8,0026944°	110,3136111°
3	Selatan	-8,010686°	110,3142°
4	Barat	-8,003195°	110,304863°
5	Utara	-7,997262°	110,31422°



Gambar 3.4 Lokasi Sampling Air Tanah

3.4 Alat dan Bahan

a. Pengambilan Sampel tanah

Alat dan bahan yang digunakan pada pengambilan sampel tanah yakni menggunakan bor tanah dan plastik zip 2L.

b. Pengambilan sampel air tanah

Sesuai SNI 6989.58:2008 tentang Air limbah dan air – Bagian 58: metode pengambilan contoh air tanah, alat pengambil sampel air tanah tergantung jenis sumur. Jika terdapat sebuah sumur bor, maka pengambilan sampel menggunakan alat *bailer*. Jika terdapat sebuah sumur gali, maka digunakan alat pengambil sampel berupa botol gelas dan *stainless* yang mempunyai ujung atas yang dapat dibuka-tutup dan terikat oleh sebuah tali serta pada ujung bawah tertutup oleh penutup yang bersifat pemberat botol. Alat lain yang digunakan yaitu pH meter, konduktivimeter, termometer, meteran, *water level meter* dan GPS. Juga digunakan alat pendingin yang dapat mendinginkan sampel air pada suhu 2 – 4 °C serta alat saring yang

dilengkapi dengan pompa hisap dan saringan berpori 0,45 μ m. Botol penyimpan sampel yang digunakan merupakan botol plastik atau gelas yang bervolume paling sedikit 100mL.

Bahan yang digunakan merupakan 2 N seng asetat dan NaOH yang digunakan untuk proses pengawetan sampel air tanah.

c. Analisis kadar timbal dan kadar besi sampel tanah

Pengujian kadar timbal dan besi mengacu pada standar pengujian yang ditetapkan oleh *Food and Agriculture Organization of the United Nations (2023)*. Alat utama yang digunakan merupakan alat spektrofotometer serapan atom. Alat lain yang digunakan merupakan glassware, *digestion vessels*, oven pengering,, timbangan analitik dan *hotplate*. Bahan yang digunakan untuk proses destruksi asam merupakan air bebas mineral, asam nitrat pekat, asam klorida pekat dan media penyaring.

d. Analisis kadar sulfida sampel air tanah

Alat dan bahan yang digunakan berdasarkan SNI 6989.70:2009 tentang Air dan air limbah – Bagian 70: Cara uji sulfida biru metilen secara spektrofotometri. Alat yang digunakan merupakan Spektrofotometer UV-Vis, *glassware* dan neraca analitik. Bahan yang digunakan merupakan larutan asam sulfat, larutan induk asam sulfat-amina, pereaksi asam sulat-amina, larutan ferri klorida, larutan asam klorida, larutan baku iodine, larutan natrium tiosulfat, larutan kalium bi-iodat, larutan kanji, asam salisilat, seng asetat, natrium hidroksida dan natrium sulfida.

3.5 Prosedur Analisis Data

3.5.1 Indeks Saturasi

Indeks Saturasi (SI) digunakan untuk mengevaluasi kondisi keseimbangan sebuah mineral dan dapat menunjukkan reaktivitas sebuah mineral serta pengaruh mineral tersebut terhadap air tanah (Brindha et al., 2019). Indeks Saturasi dihitung untuk tiga mineral timbal yang paling banyak terdapat pada kerak bumi, yaitu *galena* (PbS), *cerrusite* (PbCO₃) dan *anglesite* (PbSO₄) (National Academies of Sciences, 2017). Indeks Saturasi dihitung berdasarkan data sekunder

yang berasal dari penelitian Wilopo (2021) dan Rezhandi (2019). Data tersebut merupakan kandungan ion pada air tanah akuifer Desa Parangtritis. Kandungan Ion tersebut merupakan Na^{2+} , Ca^{2+} , K^{+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} , Cl^{-} , Pb^{2+} , , HCO_3^{-} serta data nilai pH dan suhu air tanah. Data sekunder tersebut diolah dengan metode *Inverse Distance Weighting* di *software* QGIS. Kemudian nilai parameter kualitas air tanah ditentukan untuk masing-masing lokasi pengambilan sampel tanah Indeks Saturasi dihitung menggunakan model PHREEQC.

SI terdapat dari perhitungan menggunakan rumus berikut:

$$SI = \log\left(\frac{IAP}{KP}\right)$$

IAP merupakan *Ion Activity Product* dari mineral yang diteliti dan KP merupakan konstanta kesimbangan dari mineral tersebut. Jika nilai SI negatif, maka air bersifat *undersaturated* dengan mineral yang diteliti. Jika nilai SI positif, maka air bersifat *oversaturated* dengan mineral yang diteliti. Pada kondisi *undersaturated*, mineral larut dalam air untuk mencapai kondisi keseimbangan dan pada kondisi *oversaturated* mineral akan mengendap untuk mencapai kondisi keseimbangan (Brindha et al., 2019).

3.5.2 Enrichment Factor

Enrichment factor (EF) merupakan sebuah faktor yang digunakan sebagai indikator apakah kontaminasi logam timbal diakibatkan oleh kegiatan manusia atau berasal dari sumber geogenik. Selain itu EF digunakan untuk mengevaluasi tingkat kontaminasi tanah (Soltani-Gerdefaramarzi et al., 2021). *Enrichment Factor* membandingkan kadar logam timbal nyata dan nilai BGV untuk logam timbal dengan kadar nyata serta BGV sebuah logam pembanding. Pada penelitian ini logam Fe digunakan sebagai logam pembanding karena logam Fe merupakan logam dengan ketersediaan yang tinggi di kerak bumi dan memiliki karakteristik geokimia yang similar dengan banyak logam lain (Mandal et al., 2022). Rumus *Enrichment Factor* yang digunakan merupakan rumus berikut:

$$EF = \frac{(C_n/C_{ref})_{sample}}{(B_n/B_{ref})_{background}}$$

C_n merupakan kadar besi yang diukur dan C_{ref} merupakan kadar besi yang diukur pada tanah lokasi penelitian. B_n merupakan nilai *Background Value* logam timbal yang digunakan dan B_{ref} merupakan nilai *Background Value* logam besi yang digunakan. Pada penelitian nilai BGV terdapat dari analisis kadar besi dan timbal pada kontrol sample tanah. BGV terdapat dari merata-ratakan nilai kandungan besi dan timbal pada untuk masing lapisan tanah sehingga terdapat BGV timbal dan logam untuk lapisan tanah atas dan lapisan tanah.

Nilai EF di bawah 2 merupakan sebuah indikator untuk sumber timbal geogenik, nilai EF diantara 2 dan 10 merupakan indikator sumber timbal secara geogenik dan antropogenik dan nilai EF di atas sepuluh adalah indikator sumber kandungan timbal dari kegiatan antropogenik (Mandal et al., 2022)

3.5.3 Geoaccumulation Index

Nilai I_{geo} merupakan indikator sumber kontaminasi logam berat pada tanah. I_{geo} membandingkan kadar timbal dengan BGV timbal. Rumus I_{geo} adalah berikut:

$$I_{geo} = \log_2 \frac{C_{sample}}{1,5 * C_{BGV}}$$

C_{sample} merupakan kandungan logam timbal yang diuji dalam laboratorium dan C_{BGV} merupakan nilai BGV timbal yang digunakan (Soltani-Gerdefaramarzi et al., 2021). Klasifikasi hasil perhitungan I_{geo} menurut Hizli et al.(2023) terdapat pada tabel 3.3.

Tabel 3.3 Klasifikasi nilai I_{geo}

Nilai I_{geo}	Klasifikasi
< 0	Tidak ada kontaminasi
0 – 1	Tidak ada kontaminasi – kontaminasi ringan
1 - 2	Kontaminasi ringan
2 - 3	Kontaminasi ringan – kontaminasi berat

3 - 4	Kontaminasi berat
4 - 5	Kontaminasi berat – kontaminasi ekstrim
> 5	Kontaminasi ekstrim

3.5.4 Analisis Kualitas Tanah Berdasarkan Kadar Pb di Kedalaman Tanah yang Berbeda

Setelah kadar timbal untuk masing-masing sampel tanah ditentukan, nilai kadar Pb dianalisis untuk lokasi metode sampling. Dilihat pada kedalaman yang mana terdapat kadar timbal yang lebih besar. Jika terdapat kadar timbal yang besar terdapat di kedalaman paling atas, maka hasil tersebut merupakan indikator sumber pencemaran adalah kegiatan manusia. Jika terdapat kadar timbal yang tinggi di lapisan paling bawah tanah, maka hasil tersebut merupakan indikator bahwa pencemaran berasal dari sumber geogenik (Soltani-Gerdefaramarzi et al., 2021).

BAB IV

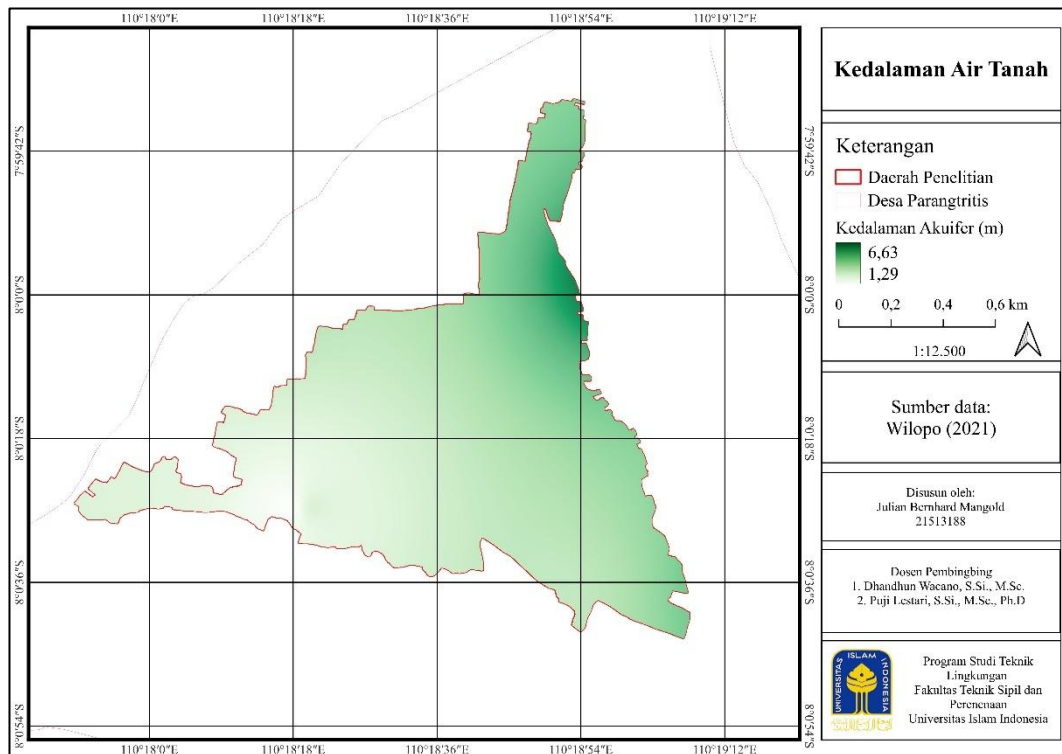
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kondisi Eksisting

4.1.1 Air Tanah

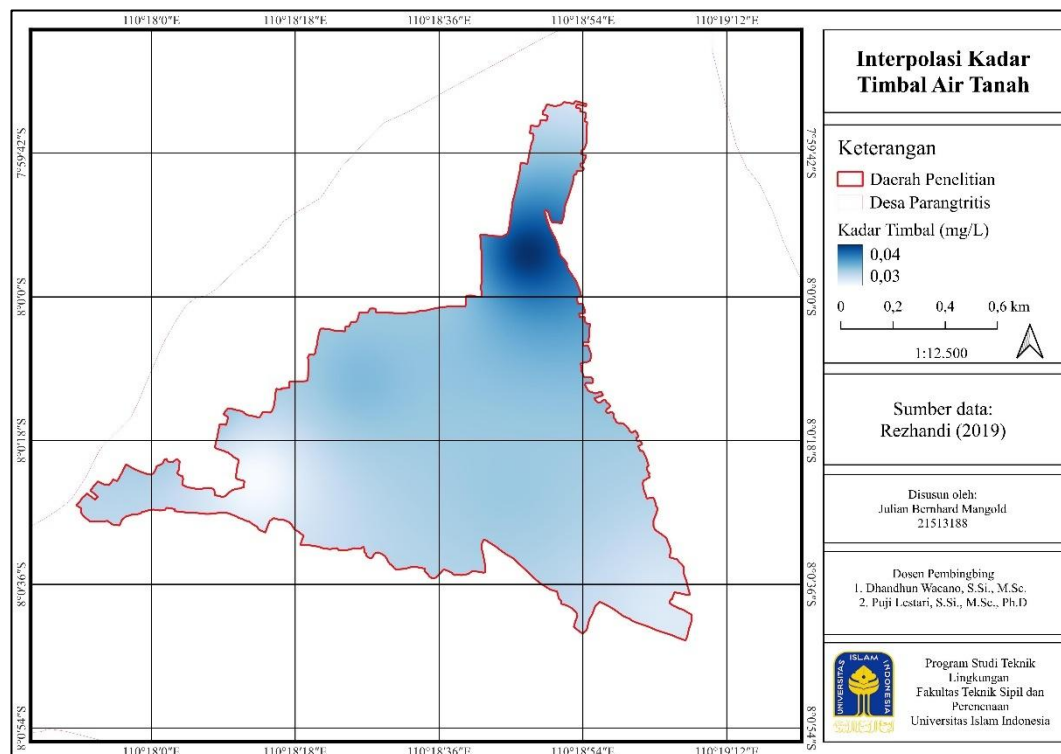
Akuifer yang terdapat pada daerah penelitian merupakan akuifer *unconfined* (Wilopo et al., 2021b). Akuifer di Desa Parangtritis terdiri sendiri dan tidak bergabung dengan akuifer yang terdapat pada Kabupaten Bantul (Sunarto et al., 2017). Petani pada daerah tersebut menggunakan sistem pemompaan air tanah dangkal sebagai sistem irigasi. Pada sistem irigasi tersebut setiap lahan pertanian memiliki satu sumur bor yang bisa dilengkapi dengan sebuah pompa listrik atau mesin berbahan bakar *portable*. Saat pompa irigasi tidak terpasang, sumur bor ditinggal dalam keadaan tidak dilindungi (terbuka). Proses irigasi biasanya dilakukan pada pagi atau sore hari oleh para petani lokal. Untuk kegiatan pertanian ini, para petani menggunakan sebanyak 2.921 liter air tanah per hari (Sujatmiko, 2019).

Hasil interpolasi nilai tinggi muka air tanah yang berdasarkan data Wilopo (2021), menunjukkan bahwa akuifer pada daerah penelitian dapat ditemui di kedalaman antara 1,27 dan 6,32 meter. Pada gambar 4.1 dapat terlihat bahwa muka air kedalaman air tanah lebih tinggi pada bagian utara daerah penelitian dan cenderung untuk menjadi lebih dangkal pada bagian selatan daerah penelitian. Akuifer paling dangkal terdapat pada bagian barat daya.



Gambar 4.1 Hasil Interpolasi Tinggi Muka Air Tanah

Pada akuifer di daerah penelitian terdapat pencemaran air tanah oleh timbal (Rezhandi, 2019). Ditemukan bahwa tiga dari lima sampel air tanah yang diambil pada daerah penelitian, melebihi baku mutu yang berlaku. Selain baku mutu air tanah yang berlaku di Indonesia kadar timbal yang ditemukan juga melebihi baku mutu yang berlaku di negara Jerman yang memiliki nilai ambang batas sebesar 0,01 mg/L (Bundesamt für Justiz, 2010). Pada gambar 4.2 terlihat bahwa kandungan timbal paling tinggi ditemukan pada bagian utara. Dan kandungan timbal paling sedikit terdapat pada bagian barat daya.



Gambar 4.2 Penyebaran Timbal pada Air Tanah

4.1.2 Tanah

Secara geomorfologi daerah penelitian terletak pada formasi aluvial dan deposit Gunung Merapi muda (Wilopo et al., 2021b). Material dari kedua formasi tersebut berasal dari lereng Gunung api Merapi. Tanah yang terdapat pada daerah penelitian merupakan tanah gleisol yang terbentuk oleh air yang menggenang selama tiga bulan dalam kurun waktu satu tahun. Tanah pada daerah penelitian berstruktur mulai dari geluh-berlempung sampai lempung (Pramono, 2007).

Di daerah penelitian pada waktu itu, vegetasi yang ditanam umumnya berupa tanaman cabai tetapi pada dua lokasi sampling yang lain, vegetasi terdiri dari tanaman cabai dan taman kacang tanah. Pada tabel 4.1 terlihat vegetasi untuk masing-masing lokasi pengambilan sampel tanah. Tanah pada lokasi pengambilan sampel bersifat keras dan bertekstur lempung. Tanah lapisan bawah lebih keras dan lebih bersifat lempung daripada tanah pada lapisan atas. Pada gambar 4.3 terlihat semua sampel tanah yang diambil. Pada gambar tersebut terlihat bahwa warna sampel tanah berkisar di antara coklat sampai abu-abu. Sampel tanah yang diambil

pada lapisan atas cenderung untuk memiliki warna yang lebih coklat dan sampel tanah yang diambil pada lapisan bawah cenderung untuk berwarna lebih abu-abu. Hal itu dapat dijelaskan karena lapisan atas memiliki kandungan organik yang lebih tinggi daripada lapisan bawah, maka warna tanah lapisan atas cenderung untuk berwarna lebih coklat daripada lapisan bawah (Liu et al., 2020). Sedangkan tanah yang abu-abu dapat merupakan indikator untuk tanah yang sering mengalami saturasi oleh air (van Huyssteen et al., 2007). Lapisan tanah bahwa lebih cenderung untuk menjadi tersaturasi oleh akuifer yang dangkal, hal itu menyebabkan tanah lapisan bawah untuk cenderung berwarna abu-abu. Selain itu tanah lapisan atas lebih gembur dan tanah di lapisan bawah lebih liat.

Tabel 4.1 Vegetasi Lokasi Pengambilan Sampel Tanah

No.	Wilayah	Vegetasi
S1	Utara	Cabai & Kacang tanah
S2	Barat	Cabai
S3	Selatan	Cabai & Kacang tanah
S4	Timur	Cabai
S5	Tengah	Cabai
K1	Desa	Pisang
K2	Desa	Pisang & Singkong



Gambar 4.3 Foto Sampel Tanah

Tanaman yang ditanam di sekitar lokasi pengambilan kontrol berupa pohon pisang dan singkong. Tanah yang terdapat pada lokasi pengambilan kontrol bertekstur lempung tetapi bersifat lebih lembut daripada tanah yang terdapat pada daerah penelitian. Pada gambar 4.4 terlihat bahwa tanah pada lokasi kontrol berwarna coklat. Terlihat bahwa pada sampel kontrol yang diambil pada lokasi kontrol kedua, memiliki kandungan organik seperti sisa daun yang lebih tinggi daripada sampel tanah yang lain.



Gambar 4.4 Sampel Tanah Kontrol

4.2 Analisis Sampel

4.2.1 Analisis air tanah

Sampel air tanah dianalisis terhadap parameter sulfida. Kualitas air parameter sulfida dibutuhkan untuk pemodelan Indeks Saturasi. Hasil kandungan sulfida yang terdapat berkisaran di antara $4,3 \times 10^{-5}$ dan $-2,4 \times 10^{-5}$. Hasil analisis blangko adalah $-2,2 \times 10^{-5}$. *Limit of detection* (LOD) dan *limit of quantification* (LOQ) alat spektrofotometer yang digunakan adalah 0,061 mg/L dan 0,203 mg/L. Semua sampel yang diuji memiliki nilai di bawah LOD, sehingga dianggap bahwa kandungan sulfida dalam air tanah tidak dapat terdeteksi karena tidak ada kandungan atau kandungan sulfida terlalu kecil. Pada tabel 4.2 terdapat hasil pengujian laboratorium air tanah terhadap parameter sulfida.

Tabel 4.2 Hasil Pengujian Kadar Sulfida Air Tanah

Sampel	Konsentrasi (mg/L)
Blangko	< 0,061
1	< 0,061
2	< 0,061
3	< 0,061
4	< 0,061

5	< 0,061
---	---------

4.2.2 Analisis Tanah

4.2.2.1 Nilai pH

Nilai pH sampel tanah dan sampel kontrol yang terdapat dari hasil analisis laboratorium berkisaran di antara 6,31 dan 7,52. Nilai pH rata-rata adalah sebesar 6,91. Dari hasil laboratorium dapat dicermati bahwa sampel kontrol memiliki nilai pH yang lebih rendah daripada sampel tanah yang diambil pada daerah penelitian. Rata-rata nilai pH sampel tanah adalah sebesar 7,12 dan rata-rata pH sampel kontrol adalah sebesar 6,39. Hal itu menunjukkan bahwa nilai pH pada sampel kontrol lebih kecil daripada nilai pH tanah yang terdapat pada daerah penelitian. Pada tabel 4.3 dapat terlihat bahwa tidak terdapat perbedaan pH yang signifikan di antara lapisan bawah dan lapisan atas. Sesuai (Natural Resource Conservation Service, n.d.) sampel tanah masuk kategori netral sedangkan sampel tanah kontrol masuk kategori asam ringan.

Tabel 4.3 Hasil Analisis pH Tanah (Diukur dalam larutan CaCl_2 0,01M)

Kode Sample	Lapisan Tanah		Rata-Rata
	Atas	Bawah	
S1	7,14	7,17	7,12
S2	7,05	7,18	
S3	7,13	7,16	
S4	7,52	7,32	
S5	6,77	6,73	
K1	6,31	6,54	6,39
K2	6,38	6,36	
Rata-Rata	6,90	6,92	

Nilai pH untuk semua sampel yang terdapat pada penelitian ini memenuhi persyaratan baku mutu kualitas tanah yang berlaku di Ekuador. Baku mutu tersebut menyatakan nilai pH di antara 6 dan 8 (Tapia Nunez, 2015). Berdasarkan penelitian Camila et al., (2023) nilai pH tanah ideal untuk pertumbuhan tanaman pertanian di Indonesia adalah di antara 5,5 dan 6,5. Nilai pH yang ditemukan pada penelitian ini memiliki nilai pH yang lebih tinggi dari nilai pH ideal tersebut. Hanya pada lokasi

kontrol ditemukan nilai pH tanah yang memenuhi rentang pH tanah ideal tersebut. Nilai pH dapat mempengaruhi mobilitas logam timbal pada tanah. Pada pH yang asam Pb cenderung untuk larut dan memiliki potensi mobilitas yang lebih tinggi. Pada pH yang lebih tinggi, Pb cenderung untuk mengurangi potensinya mobilitas karena cenderung untuk mengendap dari larutan (Elnajdi et al., 2023). Pada penelitian Kicińska et al. (2022) ditemukan bahwa peningkatan mobilitas logam timbal terjadi pada nilai pH di bawah 5. Pada penelitian ini semua sampel tanah memiliki nilai pH di atas 6, sehingga bisa dianggap bahwa timbal tidak memiliki mobilitas tinggi

Selain itu nilai pH tanah dapat mempengaruhi tingkat potensi adsorpsi timbal oleh butiran lempung. Pada penelitian Adjia et al. (2019) ditemukan bahwa potensi adsorpsi timbal pada lempung aluvial tertinggi terdapat pada pH yang netral. Hal itu diakibatkan bahwa butiran lempung memiliki permukaan yang bermuatan negatif yang bisa mengikat ion timbal yang bermuatan positif. Jika terdapat pH yang asam, ion H_3O^+ dapat mengganggu proses adsorpsi sedangkan jika pH memiliki nilai yang basa, maka ion timbal mengalami presipitasi dan tidak terikat oleh muatan negatif butiran lempung.

4.2.2.2 Kandungan Timbal

Kandungan timbal tanah dianalisis menggunakan alat AAS. Pada tabel 4.4 dapat dilihat bahwa kandungan timbal yang ditemukan pada sampel tanah berkisaran antara $6,18 \pm 1,73$ mg/kg yang ditemukan pada lokasi sampel tengah lapisan bawah dan antara $22,22 \pm 3,68$ mg/kg yang ditemukan pada lokasi selatan lapisan atas. Sesuai dengan baku mutu kualitas tanah negara Kanada, ambang batas yang berlaku adalah sebesar 140 mg/kg untuk lahan pertanian, tidak melebihi untuk semua sampel (Canadian Council of Ministers of the Environment, 1999). Selain itu, semua sampel tanah memenuhi persyaratan baku mutu yang berlaku di negara Ekuador untuk lahan pertanian. Ambang batas baku mutu tersebut adalah sebesar 60 mg/kg (Tapia Nunez, 2015). Kandungan logam yang ditemukan juga merupakan sesuai berdasarkan baku mutu negara Jerman untuk tanah yang bersifat lempung,

baku mutu tanah negara Jerman izinkan kandungan timbal tidak lebih besar daripada 70 mg/kg (Bundesamt für Justiz, 2021). Maka dapat disimpulkan bahwa tidak terjadi pencemaran timbal di tanah pada daerah penelitian.

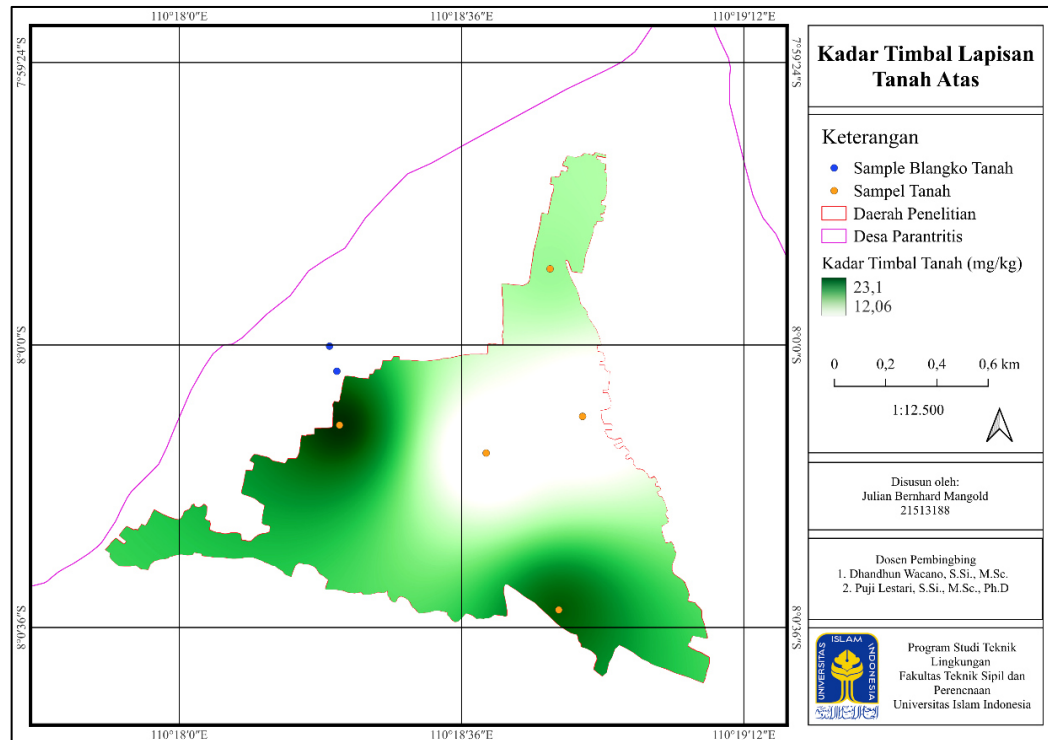
Terdapat bahwa rata-rata kadar kandungan timbal pada sampel tanah adalah sebesar 14,82 mg/kg dan kadar timbal rata-rata pada sampel kontrol adalah sebesar 6,84 mg/kg. Hal itu menunjukkan bahwa terdapat kandungan timbal tanah lebih tinggi pada daerah penelitian daripada di lokasi kontrol. Hal itu menunjukkan bahwa telah terjadi kontaminasi tanah oleh timbal pada daerah penelitian. Hasil pengujian sampel kontrol menemukan kandungan timbal yang berkisaran di antara $5,53 \pm 2,04$ mg/kg dan $8,11 \pm 0,25$ mg/kg. Kandungan timbal yang ditemukan pada sampel kontrol terdapat dari *parent material* tanah yang merupakan material *pyroclastic* dari Gunung Merapi. Pada abu vulkanik Gunung Merapi terdapat kandungan timbal sebesar 16,71 mg/kg (Wahyuni et al., 2012).

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Kandungan Timbal

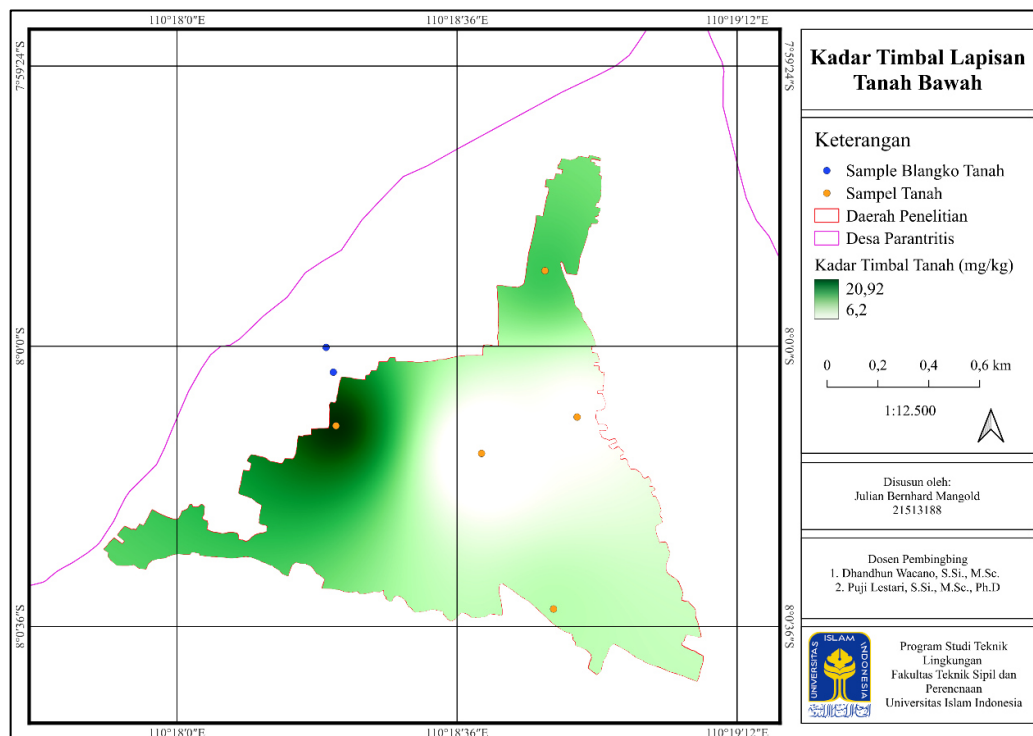
No.	Sampel	Kode Sampel	Lapisan	Kadar Timbal (mg/kg)	St. Dev. (mg/kg)
1	Utara	1A	Atas	16,77	0,33
		1B	Bawah	15,16	0,72
2	Barat	2A	Atas	23,12	7,51
		2B	Bawah	20,95	4,19
3	Selatan	3A	Atas	22,22	3,68
		3B	Bawah	11,49	1,17
4	Timur	4A	Atas	12,17	1,23
		4B	Bawah	8,06	2,18
5	Tengah	5A	Atas	12,05	5,62
		5B	Bawah	6,18	1,73
6	Kontrol 1	B1A	Atas	5,53	2,04
		B1B	Bawah	8,11	0,25
7	Kontrol 2	B2A	Atas	5,66	0,12
		B2B	Bawah	8,04	1,45

Hasil Interpolasi spasial kandungan timbal untuk lapisan tanah atas dan tanah bawah dapat terlihat pada gambar 4.5 dan gambar 4.6. Hasil interpolasi menunjukkan bahwa kadar timbal yang lebih tinggi terdapat pada area barat

wilayah penelitian untuk lapisan tanah atas maupun bahwa. Di area selatan dan tengah daerah penelitian terdapat kadar timbal yang lebih kecil. Perbedaan di antara kedua lapisan tanah yang paling signifikan terdapat pada wilayah selatan daerah penelitian, di mana kandungan timbal pada lapisan tanah atas termasuk tinggi tetapi pada tanah lapisan bawah, kandungan timbal lebih sedikit.



Gambar 4.5 Hasil Interpolasi Kadar Timbal Lapisan Atas



Gambar 4.6 Hasil Interpolasi Kadar Timbal Lapisan Tanah Bawah

4.2.2.3 Kadar Besi

Kadar besi yang paling rendah ditemukan pada sampel tanah wilayah tengah lapisan bawah dengan kadar besi sebesar 24.420 ± 412 mg/kg dan kadar besi paling tinggi ditemukan pada sampel wilayah selatan lapisan tanah bawah dengan kadar besi sebesar 43.757 ± 2.137 mg/kg. Kadar besi yang ditentukan pada sampel kontrol berkisaran di antara 33.046 ± 503 mg/kg dan 37.021 ± 334 mg/kg. Rata-rata kandungan besi pada tanah daerah penelitian adalah sebesar 33.529 mg/kg dan rata-rata kandungan besi pada sampel kontrol adalah sebesar 34.364 mg/kg. Hal itu menunjukkan bahwa kandungan besi pada daerah penelitian mirip dengan kandungan besi pada sampel kontrol. Kandungan besi yang terdapat pada wilayah penelitian terdapat pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Kandungan Besi Pada Wilayah Penelitian

No	Sample	Kode Sampel	Lapisan	Kadar Besi (mg/kg)	St. Dev (mg/kg)
1	Utara	S1A	Atas	34329	139

		S1B	Bawah	26293	26
2	Barat	S2A	Atas	35052	44
		S2B	Bawah	32726	2164
3	Selatan	S3A	Atas	40110	432
		S3B	Bawah	43757	2137
4	Timur	S4A	Atas	36968	709
		S4B	Bawah	30827	610
5	Tengah	S5A	Atas	30804	1736
		S5B	Bawah	24420	412
6	Kontrol 1	B1A	Atas	33046	503
		B1B	Bawah	37021	334
7	Kontrol 2	B2A	Atas	34074	2758
		B2B	Bawah	33315	4052

Wahyuni et al. (2012) menemukan kandungan besi oksida (Fe_2O_3) pada abu vulkanik Gunung Merapi sebesar 91.700 mg/kg. Tanah pada daerah penelitian berasal dari Gunung Merapi, maka bisa dianggap bahwa kandungan besi yang terdapat pada tanah daerah pertanian berasal dari sumber geogenik yaitu material geologis yang terdapat pada Gunung Merapi. Hal itu didukung oleh fakta bahwa kandungan besi pada daerah penelitian hanya sedikit lebih besar daripada kandungan besi yang ditemukan pada lokasi sampel kontrol. Hal ini merupakan indikator bahwa kegiatan pada daerah pertanian belum mempengaruhi kadar besi tanah secara signifikan.

4.3 Natural Background Value (BGV)

Natural Background Value (BGV) merupakan nilai kandungan mineral atau logam berat yang terdapat secara alamiah pada tanah atau kandungan alamiah yang hanya sedikit dipengaruhi oleh kegiatan manusia. Nilai BGV sangat penting untuk identifikasi sebuah pencemaran atau kontaminasi pada tanah, di mana dianggap bahwa telah terjadi kontaminasi atau pencemaran tanah jika terdapat bawah kandungan yang ditemukan melebihi nilai BGV (Sun et al., 2019). Pada penelitian ini BGV ditetapkan berdasarkan nilai kadar besi dan timbal yang ditemukan pada sampel tanah kontrol. Untuk pengambilan sampel kontrol dipilih dua lokasi yang berlokasi dekat dengan lokasi penelitian dan merupakan lokasi yang belum terkena

paparan pupuk kimia dan pestisida. Untuk pengambilan sampel yang digunakan untuk menentukan BGV penting memilih lokasi pengambilan sampel yang terletak jauh dari zona industri, lebih jauh dari 200m dari jalan besar, lebih jauh daripada 25 m dari jalan lokal, 100m lebih jauh daripada bangunan rumah, lebih jauh daripada 50 dari daerah pertanian serta tidak terletak pada wilayah dengan kondisi geologis khusus (Mikkonen et al., 2017). Lokasi pengambilan sampel kontrol yang dipilih pada penelitian ini memenuhi persyaratan ini kecuali lokasi pengambilan sampel kontrol lebih dekat dari 100m dengan rumah warga. Kepadatan penduduk dan kondisi geologis tidak memungkinkan untuk mengambil sampel kontrol yang lebih jauh dari rumah warga karena pada Desa Parangtritis lokasi yang lebih jauh daripada 100m dari rumah warga merupakan wilayah pertanian serta gumpukan pasir yang secara geomorfologi sangat berbeda dengan daerah penelitian. Hal itu memungkinkan bahwa tanah sampel kontrol kemungkinan mengalami kontaminasi timbal yang berasal dari sampah yang dibuang sembarang yang dapat merupakan sumber kontaminasi tanah (Lestari et al., 2019). Pada penelitian ini ditentukan BGV untuk masing-masing lapisan tanah, yaitu lapisan atas dan lapisan bawah.

Pada tabel 4.6 terdapat bahwa rata-rata kadar besi untuk sampel kontrol lapisan tanah atas adalah sebesar 33.560 mg/kg, sehingga nilai ini digunakan sebagai BGV besi untuk lapisan atas. BGV besi lapisan bawah adalah rata-rata nilai sampel kontrol lapisan bawah yang adalah setinggi 35.168 mg/kg.

Tabel 4.6 Kandungan Besi Pada Lokasi Kontrol

Lokasi	Lapisan atas (mg/kg)	Lapisan bawah (mg/kg)
Kontrol 1	33046	37021
Kontrol 2	34074	33315
Rata-Rata	33560	35168

Pada tabel 4.7 terlihat bahwa rata-rata kandungan timbal yang ditemukan pada sampel kontrol lapisan atas adalah sebesar 5.59 mg/kg dan rata-rata kandungan timbal lapisan bawah sampel kontrol adalah sebesar 8.08 mg/kg. Maka keduanya nilai ditetapkan sebagai BGV untuk kandungan timbal pada tanah daerah penelitian.

Tabel 4.7 Kandungan Timbal Pada Sampel Kontrol

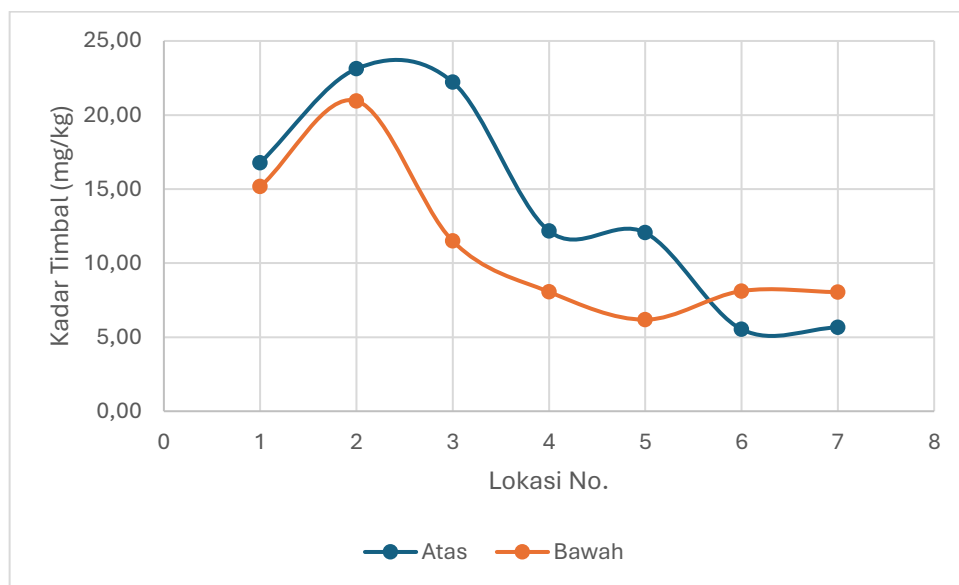
Lokasi	Lapisan atas (mg/kg)	Lapisan bawah (mg/kg)
Kontrol 1	5.53	8.11
Kontrol 2	5.66	8.04
Rata-Rata	5.59	8.08

Dibandingkan dengan BGV yang ditetapkan di negara Ekuador yang memiliki nilai 25mg timbal per 1 kg tanah, BGV yang ditetapkan pada penelitian ini lebih kecil (Tapia Nunez, 2015). Tetapi BGV yang ditetapkan pada penelitian ini mirip dengan BGV timbal yang ditetapkan pada penelitian Budianta (2012) yang menetapkan BGV untuk tanah aluvium yang berasal dari Gunung Merapi sebesar 5mg/kg. Penelitian tersebut dilaksanakan di Kota Yogyakarta yang berdekatan dengan daerah penelitian ini. BGV tersebut utamanya sangat mirip dengan BGV yang ditetapkan pada penelitian ini di lapisan tanah atas. Hal itu bisa dijelaskan bahwa kedalaman sampling tanah pada penelitian Budianta (2012) dilaksanakan pada lapisan tanah atas.

Terdapat bahwa semua sampel tanah yang diambil pada daerah penelitian melebihi BGV kecuali sampel tanah yang diambil pada lokasi tengah daerah penelitian pada lapisan tanah bawah. Kadar timbal tertinggi yang ditemukan pada daerah penelitian memiliki kandungan timbal yang 413% lebih tinggi daripada BGV. Hal itu menunjukkan bahwa telah terjadi kontaminasi tanah pada daerah penelitian (Gholizadeh et al., 2018). Salah satu sumber polutan timbal pada tanah merupakan penggunaan pupuk kimia dan pestisida (Eugenio et al., 2018). Pada daerah penelitian tidak terdapat penggunaan lahan selain kegiatan pertanian. Oleh karena itu kandungan timbal tanah di atas BGV pada 90% dari jumlah sampel yang diambil merupakan salah satu indikator bahwa telah terjadi kontaminasi tanah parameter timbal oleh penggunaan pupuk dan pestisida.

4.4 Analisis Berdasarkan Kandungan Timbal pada Lapisan Atas dan Bawah

Untuk setiap lokasi pengambilan sampel tanah (No. 1-5) terdapat bahwa kandungan timbal pada lapisan atas lebih tinggi daripada lapisan bawah, hal itu dapat terlihat pada gambar 4.7. Sedangkan pada dua lokasi sampel kontrol (No.6,7) terdapat kandungan timbal lebih besar pada lapisan bawah daripada lapisan atas. Hal tersebut menunjukkan bahwa ada pengaruh dari kegiatan pertanian kepada kandungan timbal pada tanah yang meningkatkan kadar timbal pada lapisan atas tanah daerah penelitian.



Gambar 4.7 Grafik Kandungan Timbal Lapisan Tanah Atas dan Bawah

Pada pengujian sampel kontrol terdapat bahwa kandungan timbal yang lebih besar ditemukan pada lapisan yang lebih dalam dan kandungan timbal pada lokasi yang pada lapisan tanah yang lebih di atas merupakan lebih kecil. Hal itu menunjukkan bahwa pada lokasi kontrol tidak terkena paparan pupuk dan pestisida kimia karena paparan timbal oleh pupuk dan pestisida digunakan pada permukaan tanah. Sedangkan pada sampel tanah yang diambil pada daerah pertanian, terdapat untuk semua titik sampling bahwa kandungan timbal lebih besar pada lapisan atas daripada lapisan bawah. Hal itu menunjukkan bahwa sumber timbal berasal dari permukaan tanah, merupakan indikator bahwa kontaminasi timbal diakibatkan oleh penggunaan pupuk dan pestisida kimia. Hal itu juga didukung dengan fakta bahwa

rata-rata kadar timbal lebih besar pada daerah pertanian daripada pada sampel kontrol dan tidak dapat penggunaan lahan lain pada daerah penelitian selain kegiatan pertanian.

4.5 Enrichment Factor (EF)

Pada penelitian ini besi digunakan sebagai logam referensi karena besi adalah logam dengan kandungan yang terbesar pada kerak bumi dan tidak dapat dipengaruhi dengan mudah dari faktor antropogenik (Mandal et al., 2022). Pada penelitian Schiff & Weisberg (1999) ditemukan bahwa besi cocok sebagai logam referensi pada proses analisis pencemaran timbal di tanah. Pada perhitungan EF digunakan *Background value* (BGV) yang merupakan kandungan timbal atau besi yang terdapat secara alamiah pada tanah (Sun et al., 2019).

Logam referensi lain yang sering digunakan sebagai logam referensi pada penentuan EF logam timbal adalah logam aluminium. Aluminium cocok digunakan sebagai logam referensi karena kandungan pada tanah terutama berasal dari kerak bumi (Uduma, 2014). Selain itu, logam aluminium juga merupakan logam yang bersifat konservatif (Barbieri, 2016). Ditemukan bahwa aluminium merupakan salah satu logam referensi yang memiliki tingkat ketidakpastian yang sangat kecil ($\pm 7\%$) pada penentuan EF logam timbal pada lingkungan yang bersifat anaerobik seperti sedimen danau. Pada sedimen tersebut, kandungan logam aluminium tidak mengalami perubahan konsentrasi selama 25 tahun (Boës et al., 2011). Pada sedimen ditemukan bahwa aluminium lebih berpotensi untuk menjadi logam referensi pada perhitungan EF untuk logam berat daripada besi karena konsentrasi besi lebih mudah berubah akibat reaksi *red-ox* dan proses hidrodinamika yang dapat mengubah konsentrasi besi pada sedimen (Mehlhorn et al., 2024). Keuntungan lain dari logam aluminium sebagai logam referensi adalah aluminium merupakan logam dengan tingkat kontaminasi pada daerah perdesaan yang tidak signifikan. Selain itu penggunaan aluminium sebagai logam referensi untuk penentuan EF untuk logam timbal sudah divalidasi dengan metode analisis isotop Pb (Bourennane et al., 2010). Untuk mendapat hasil *Enrichment Factor* yang lebih indikatif seharusnya digunakan logam referensi aluminium. Aluminium merupakan logam referensi

yang lebih cocok untuk tanah yang bersifat jenuh air atau sering mengalami genangan air.

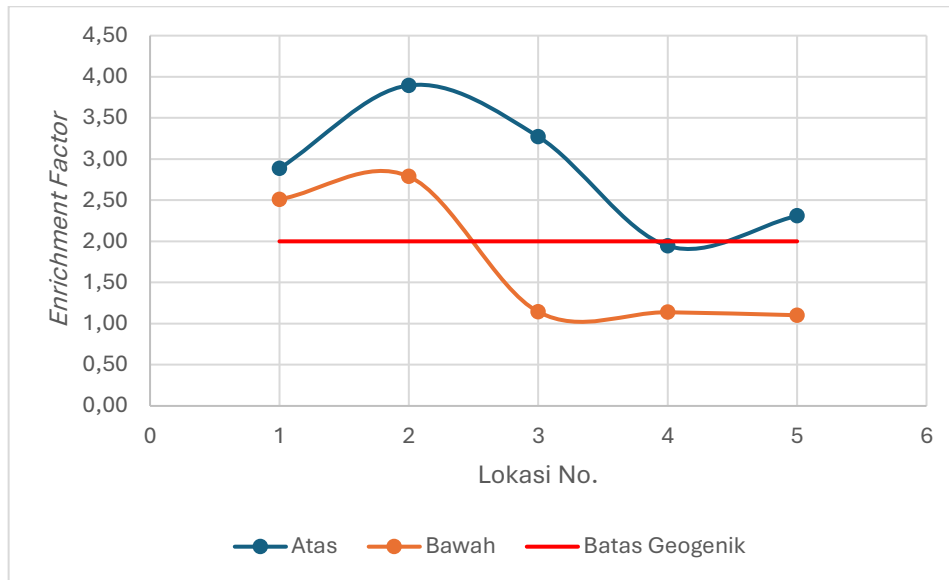
Hasil perhitungan EF adalah bahwa pada dua lokasi sampling kadar timbal dipengaruhi oleh kegiatan geogenik dan antropogenik, pada dua lokasi sampling kandungan timbal dipengaruhi oleh faktor geogenik dan antropogenik pada lapisan atas dan oleh faktor geogenik pada lapisan bawah. Pada satu lokasi sampling di mana kadar timbal hanya dipengaruhi oleh faktor geogenik. Hasil perhitungan EF dapat terlihat pada tabel 4.8. Nilai rata-rata EF yang ditemukan pada daerah penelitian adalah sebesar 2,30. Hal itu merupakan salah satu indikator bahwa secara keseluruhan kadar timbal pada daerah penelitian terdapat dari sumber antropogenik dan geogenik. Hal itu merupakan indikator tambahan bahwa telah terjadi kontaminasi timbal pada daerah penelitian oleh penggunaan pupuk dan pestisida.

Tabel 4.8 Hasil Perhitungan EF

Lokasi	Sampel	Keterangan	Kadar Timbal (mg/kg)	Kadar Besi (mg/kg)	BGV Timbal (mg/kg)	BGV Besi (mg/kg)	EF	Definisi
Utara	1A	Atas	16,77	34.329	5,59	33.046	2,89	geogenik & antropogenik
	1B	Bawah	15,16	26.293	8,08	35.168	2,51	geogenik & antropogenik
Barat	2A	Atas	23,12	35.052	5,59	33.046	3,90	geogenik & antropogenik
	2B	Bawah	20,95	32.726	8,08	35.168	2,79	geogenik & antropogenik
Selatan	3A	Atas	22,22	40.110	5,59	33.046	3,27	geogenik & antropogenik
	3B	Bawah	11,49	43.757	8,08	35.168	1,14	geogenik
Timur	4A	Atas	12,17	36.968	5,59	33.046	1,94	geogenik
	4B	Bawah	8,06	30.827	8,08	35.168	1,14	geogenik
Tengah	5A	Atas	12,05	30.804	5,59	33.046	2,31	geogenik & antropogenik
	5B	Bawah	6,18	24.420	8,08	35.168	1,10	geogenik

Pada gambar 4.8 terlihat bahwa untuk semua lokasi sampling EF adalah lebih besar pada lapisan atas daripada lapisan bawah tanah. Semakin besar nilai EF, maka semakin besar pengaruh dari aktivitas manusiawi (Mandal et al., 2022). Hal

itu merupakan indikator lain bahwa tanah telah mengalami kontaminasi oleh aktivitas manusiawi yaitu kegiatan pertanian.



Gambar 4.8 Grafik Hasil Perhitungan EF

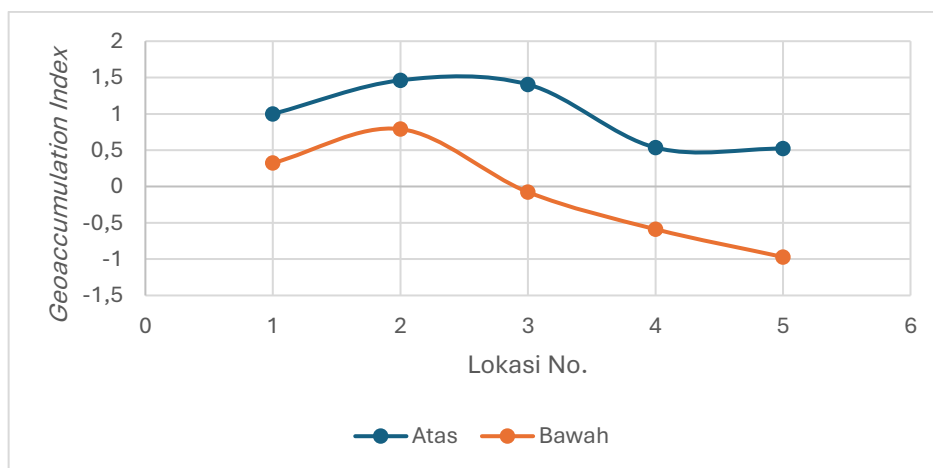
4.6 Geoaccumulation Index (I_{geo})

I_{geo} yang terdapat pada penelitian ini berkisaran di antara -0,97 dan 1,46. Rata-rata I_{geo} yang terdapat adalah sebesar 0,44 dengan rata-rata untuk lapisan atas sebesar 0,98 dan rata-rata untuk lapisan bawah sebesar -0,10. Terdapat dua lokasi sampling di mana nilai I_{geo} menunjukkan tidak ada kontaminasi untuk lapisan bawah dan tidak ada kontaminasi sampai kontaminasi sedang untuk lapisan atas. Pada satu lokasi sampling di mana tidak ada kontaminasi untuk lapisan bawah dan kontaminasi sedang untuk lapisan atas. Satu lokasi tidak ada kontaminasi sampai kontaminasi sedang pada lapisan bawah dan kontaminasi sedang pada lapisan atas serta satu lokasi sampling dengan tidak ada kontaminasi sampai kontaminasi sedang untuk kedua lapisan tanah. Rata-rata I_{geo} adalah sebesar 0,44. Nilai tersebut menunjukkan bahwa daerah penelitian mengalami kontaminasi ringan. Dalam grafik pada gambar 4.9 dapat terlihat bahwa I_{geo} untuk semua lokasi lebih besar pada lapisan atas daripada lapisan bawah. Hal itu menunjukkan bahwa kontaminasi tanah berasal dari atas, yaitu sumber antropogenik. Pada tabel 4.9 terdapat hasil

perhitungan Igeo. Hasil perhitungan I_{geo} merupakan indikator lain yang menunjukkan bahwa kontaminasi tanah diakibatkan oleh kegiatan pertanian.

Tabel 4.9 Hasil Perhitungan Igeo

Lokasi	Sampel	Keterangan	Kadar Timbal (mg/kg)	BGV Timbal	Igeo	Definisi
Utara	1A	Atas	16,77	5,59	1,00	tidak ada kontaminasi - kontaminasi sedang
	1B	Bawah	15,16	8,08	0,32	tidak ada kontaminasi - kontaminasi sedang
Barat	2A	Atas	23,12	5,59	1,46	Kontaminasi sedang
	2B	Bawah	20,95	8,08	0,79	tidak ada kontaminasi - kontaminasi sedang
Selatan	3A	Atas	22,22	5,59	1,40	Kontaminasi sedang
	3B	Bawah	11,49	8,08	-0,08	tidak ada kontaminasi
Timur	4A	Atas	12,17	5,59	0,54	tidak ada kontaminasi - kontaminasi sedang
	4B	Bawah	8,06	8,08	-0,59	tidak ada kontaminasi
Tengah	5A	Atas	12,05	5,59	0,52	tidak ada kontaminasi - kontaminasi sedang
	5B	Bawah	6,18	8,08	-0,97	tidak ada kontaminasi



Gambar 4.9 Hasil Perhitungan Igeo

4.7 Indeks Saturasi (SI)

Indeks saturasi pada lokasi pengambilan sample tanah dihitung untuk mineral *cerussite* (PbCO_3) dan *anglesite* (PbSO_4) menggunakan *software* PHREEQC. Perhitungan untuk mineral *galena* (PbS) tidak dilaksanakan karena pada analisis kadar sulfida di laboratorium hasil kadar sulfida adalah di bawah *limit of detection*. Pada tabel 4.10 terlihat bahwa nilai maksimum SI untuk mineral anglesit adalah sebesar -4,46 dan nilai minimal adalah sebesar -4,69. Untuk mineral cerusit nilai SI maksimum adalah sebesar -0,97 dan nilai minimum adalah sebesar -1,05.

Tabel 4.10 Hasil Perhitungan Indeks Saturasi

No.	Sampel	PbSO_4	PbCO_3
1	Utara	-4.46	-0.97
2	Barat	-4.51	-1.05
3	Selatan	-4.66	-1.04
4	Timu	-4.69	-1.03
5	Tengah	-4.59	-1.04
6	Kontrol 1	-4.46	-1.05
7	Kontrol 2	-4.47	-1.05
Rata-Rata		-4.55	-1.03

Indeks Saturasi yang terdapat pada perhitungan menunjukkan bahwa kedua mineral *cerussite* dan *anglesite* berada dalam keadaan *undersaturated*. Rata-rata hasil indeks saturasi untuk mineral *anglesite* adalah sebesar -4,55 dan rata-rata indeks saturasi untuk mineral *cerussite* adalah sebesar -1,03. Mineral yang bersifat tersaturasi pada air tanah mempengaruhi kualitas air tanah (Ullah et al., 2022). Semakin tinggi nilai SI pada air tanah, maka semakin tinggi kualitas air tanah dipengaruhi oleh proses *weathering* batuan dan mineral (Panda et al., 2020). Nilai SI yang negatif merupakan indikator bahwa tidak terdapat cukup banyak kandungan mineral pada sebuah akuifer sehingga air tanah bersifat *undersaturated* kepada mineral tersebut (C. K. Singh et al., 2014). Pada penelitian ini nilai SI menunjukkan bahwa mineral *cerussite* dan *anglesite* berada dalam keadaan

undersaturated, maka hasil perhitungan SI menunjukkan bahwa keduanya mineral tidak merupakan sumber pencemaran timbal pada air tanah daerah penelitian. *Anglesite* dan *cerussite* merupakan salah satu mineral timbal yang paling sering ditemukan pada kerak bumi (National Academies of Sciences, 2017). Oleh karena itu bisa dianggap bahwa pencemaran timbal pada air tanah tidak berasal dari sumber geogenik.

4.8 Paparan Kandungan Timbal oleh Kegiatan Pertanian

Tingkat produksi padi pada daerah penelitian adalah sebesar 8,5 ton/ha (Kalurahan Parangtitis, 2019). Produktivitas panen padi masuk golongan produktivitas tinggi. Dosis penggunaan pupuk yang disarankan adalah sebesar 300-400 kg/ha (Menteri Pertanian, 2007). Untuk budidaya cabai disarankan untuk memakai 150-200 kg/ha pupuk urea (Dinas Ketahanan Pangan dan Pertanian Kabupaten Ngawi, 2023). Untuk pertanian bawang merah dosis pupuk urea yang dapat menghasilkan panen terbesar adalah sebanyak 300kg/ha. (Rianti et al., 2021). Dari data tersebut terdapat bahwa dosis pupuk yang dapat digunakan pada daerah penelitian dapat mencapai 217,1 ton pupuk urea per hektar dan tahun. Hal itu menunjukkan bahwa kegiatan pertanian menggunakan banyak pupuk yang dapat menjadi sumber timbal pada daerah penelitian. Ringkasan dosis rekomendasi pupuk urea dapat terlihat pada tabel 4.11.

Tabel 4.11 Dosis Pemakaian Pupuk Urea

No.	Tanaman	Frekuensi tanam (tahun ⁻¹)	Dosis Pupuk (kg)	Refrensi	Luas area pertanian (ha)	Subtotal (kg/ha/thn)
1	Padi	1	350	Menteri Pertanian, 2007	167	58450
2	Cabai	2	175	Dinas Ketahanan Pangan dan	167	58450

				Pertanian Kabupaten Ngawi, 2023		
3	Bawang merah	2	300	Rianti et al., 2021	167	100200
Total (kg/ha/thn)						217100

Pada penelitian Dewi et al. (2022) ditemukan bahwa pupuk urea memiliki kandungan timbal sebanyak 10.53 mg/kg. Maka jumlah timbal yang dapat disebarkan ke daerah penelitian adalah sebesar 2.286 kg timbal dalam setahun jika petani lokal menggunakan jumlah pupuk yang disarankan atau dosis optimum. Selain itu pada penelitian Dewi et al. (2022) ditemukan bahwa pestisida yang digunakan pada budidaya bawang merah di Indonesia juga mengandung timbal. Pada pestisida tersebut ditemukan kandungan timbal dengan kandungan maksimum sebesar 22,32 mg/kg dan dengan kandungan minimum sebesar 2,70 mg/kg. Berdasarkan data tersebut bisa dianggap bahwa selain pupuk urea juga penggunaan pestisida dapat meningkatkan kadar timbal pada tanah. Pada Penelitian Ustiatik et al. (2024) ditemukan bahwa petani lokal menggunakan pupuk anorganik dan pestisida berlebihan dengan menggunakan dosis yang melebihi rekomendasi dari kementerian. Selain itu ditemukan bahwa penggunaan pupuk dan pestisida dapat menyebabkan akumulasi logam berat pada tanah.

4.9 Hubungan Kontaminasi Tanah dan Pencemaran Air tanah

Kandungan Timbal cenderung untuk mengikuti air saat rembes ke tanah. Tetapi kadar timbal tersebut dapat diadsorpsi oleh butiran tanah dan bahan organik yang terdapat pada tanah. Proses adsorpsi meningkat timbal pada tanah dan tidak dapat menyebar lagi ke lapisan tanah yang lebih dalam (Binh et al., 2021). Lempung merupakan medium yang berpotensi tinggi untuk adsorpsi timbal dan logam berat lain. Lempung memiliki luas permukaan efektif yang tinggi dan dapat

mengabsorpsi timbal dengan mekanisme ion-exchange pada permukaan dan dengan mekanisme absorpsi logam berat yang dikompleksisasi (Adegoke & Babatunde, 2012). Penelitian Adjia et al. (2019) menemukan kemampuan lempung aluvial yang tinggi untuk adsorpsi timbal. Ditemukan bahwa permukaan efektif adalah sebesar 104 m²/g dan *Cation Echange Potential* adalah sebesar 63 meq/100g.

Potensi adsorpsi timbal oleh butiran lempung didukung oleh penemuan penelitian ini di mana pada lapisan tanah bawah ditemukan bahwa kadar timbal hanya melebihi BGV sebesar 53%. Sedangkan pada lapisan atas rata-rata kadar timbal melebihi BGV sebanyak 208%. Hal itu menunjukkan bahwa dalam kedalaman 50cm sudah terjadi adsorpsi dari sebagian besar dari kandungan timbal. Hal itu merupakan indikator bahwa kontaminasi timbal pada tanah tidak menyebabkan pencemaran air tanah yang ditemukan oleh Rezhandi (2019). Hal itu didukung oleh penelitian yang dilakukan oleh Giuseppe et al. (2014) terdapat bahwa pada tanah alluvium yang mengandung timbal di antara 12,3 dan 17,1 mg/kg, pada pengujian *leaching* menggunakan aquades, *leachate* yang dihasilkan tidak mengandung timbal. Faktor lain yang mendukung adsorpsi timbal oleh tanah pada daerah penelitian adalah bahwa nilai pH pada tanah tersebut memiliki nilai pH pada lapisan atas maupun lapisan bawah yang netral dan pada pH yang netral potensi absorpsi timbal oleh butiran lempung adalah paling tinggi serta timbal memiliki mobilitas yang sedikit pada pH tersebut.

Hanya adalah satu faktor yang memudahkan pemindahan timbal menuju air tanah pada daerah penelitian, yaitu muka air tanah yang sangat dangkal. Hasil penelitian Wilopo (2021) menemukan bahwa kedalaman akuifer berkisar di antara 1,27 dan 6,32 meter. Pada wilayah dengan kedalaman akuifer 1,27 proses pemindahan logam berat kepada akuifer dipermudah karena timbal tidak harus mencapai kedalaman tanah yang dalam untuk dapat mencemari air tanah. Dari peta interpolasi pencemaran timbal pada air tanah (gambar 4.1) dan peta kualitas air tanah parameter timbal (gambar 4.2) tidak dicermati sebuah korelasi kandungan timbal dan muka air tanah karena kandungan timbal tertinggi pada air tanah ditemukan pada wilayah utara daerah penelitian tetapi pada wilayah tersebut

kedalaman akuifer merupakan paling dalam daripada wilayah lain pada daerah penelitian. Dan bagian daerah penelitian di mana akuifer memiliki kedalaman paling dangkal kadar timbal air tanah lebih kecil daripada bagian daerah penelitian lain.

Secara keseluruhan dapat dianggap bahwa kontaminasi tanah oleh kegiatan pertanian tidak mempengaruhi kualitas air tanah. Tetapi untuk membuktikan hal tersebut dibutuhkan penelitian lanjutan untuk menentukan potensi adsorpsi dari tanah yang terdapat pada daerah penelitian yang berdasarkan data primer.

4.10 Sumber Potensial Lain Pencemaran Akuifer

Sumber yang dapat menjadi sumber pencemaran timbal air tanah pada daerah penelitian kemungkinan adalah Sungai Opak. Sungai Opak membatasi akuifer Desa Parangtritis pada sisi barat. Pada sungai Opak ditemukan kadar timbal pada bagian hilir sebesar 0,08 mg/L yang melebihi baku mutu yang berlaku. Kadar timbal tersebut dapat berasal dari kegiatan pertanian, domestik serta industri. Selain itu diduga bahwa kandungan timbal tersebut berasal dari air lindi yang berasal dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) daerah Piyungan (Santoso, 2023). Menurut penelitian Wilopo (2021) akuifer Desa Parangtritis merupakan akuifer efluen yang mempengaruhi pengaliran Sungai Opak. Berdasarkan fakta tersebut seharusnya bahwa kualitas air tanah tidak dapat dipengaruhi oleh air sungai pada daerah penelitian karena air mengalir dari akuifer ke badan airnya Sungai Opak. Tingkat muka air akuifer dapat berubah berdasarkan jumlah hujan. Pada musim kemarau muka air tanah cenderung untuk terletak lebih dalam daripada pada musim hujan (Sejati & Prayoga, 2023). Daerah aliran sungai Sungai Opak adalah sebesar 63.886 km² (Luthfiah et al., 2024). Maka dengan DAS sungai Debit Sungai Opak tidak terlalu dipengaruhi oleh curah hujan daripada akuifer Desa Parangtritis yang memiliki luas area *recharge* yang jauh lebih kecil. Kemungkinan bisa terjadi bahwa muka air akuifer Desa Parangtritis menurun di bawah muka air Sungai Opak pada musim kemarau dan air dari Sungai Opak masuk ke akuifer Desa Parangtritis dan menyebabkan pencemaran air tanah timbal pada akuifer tersebut. Tetapi dibutuhkan

penelitian lanjutan untuk analisis terhadap perubahan muka air Sungai Opak dan akuifer Desa Parangtritis.

Sumber potensial pencemaran timbal pada air tanah merupakan pembukitan gamping yang terdapat pada sisi timur Desa Parangtritis. Ditemukan bahwa batuan gamping mengandung timbal sebesar 3,1 mg/kg (Hatree & Veizer, 1982). Tetapi kandungan tersebut cukup kecil dan selain itu batuan gamping dapat digunakan pada pengolahan air limbah untuk proses adsorpsi logam berat timbal (Ghazy & Ragab, 2007). Oleh karena itu bisa dianggap bahwa batuan gamping tersebut tidak merupakan sumber pencemaran timbal air tanah pada daerah penelitian.

Kandungan timbal yang terdapat pada tanah pertanian dapat berasal dari proses pembakaran bahan bakar berminyak (Fitrianah et al., 2019). Pada penggunaan bahan bakar minyak timbal diemisikan timbal ke udara ambien (Ismiyati et al., 2014). Timbal yang terdapat pada udara ambien akibat proses pembakaran minyak bakar pada proses transportasi, dapat mengalami deposisi basah atau kering (Fitrianah et al., 2019) Hal itu menyebabkan pemindahan zat pencemar dari medium udara ambien ke medium tanah. Pada penelitian Ruslinda et al. (2016) ditemukan bahwa di Indonesia pembakaran satu liter bensin premium menyebabkan emisi timbal sebanyak 0,56 – 0,63 gram timbal. Pada penelitian ini tidak terdapat korelasi di antara kadar timbal tanah dan gas emisi kendaraan pada analisis spasial. Hal itu dapat terlihat bahwa bagian daerah penelitian yang dekat dengan jalan raya memiliki kadar timbal yang lebih kecil daripada kadar timbal tanah pada daerah yang lebih jauh dari jalan raya.

Penyebab potensial yang lain untuk pencemaran logam berat timbal pada lingkungan merupakan limbah domestik (Souisa, 2017). Pada limbah domestik ditemukan kandungan timbal. Kandungan timbal tersebut terutama diakibatkan oleh limbah sisa cat yang mengandung timbal (Komarudin et al., 2021). Jenis limbah domestik lain yang dapat menyebabkan pencemaran timbal adalah limbah elektronik dan aki bekas. Limbah domestik tersebut dapat mencemari tanah secara langsung atau melalui proses adsorpsi dari air yang telah dicemari (Kumaladewi, 2020) Pada penelitian ini, hasil analisis kadar sampel kontrol dengan lokasi pengambilan di permukiman, menunjukkan kadar timbal yang terkecil. Hal itu

menunjukkan bahwa limbah domestik tidak memiliki dampak yang signifikan terhadap kandungan timbal pada penelitian ini.

Sebab pencemaran air tanah yang lain dapat merupakan sumur bor yang digunakan oleh petani untuk keperluan irigasi. Sumur bor yang tidak ditutup dengan rapat dapat membiarkan *run-off* mengalir melalui lubang sumur ke akuifer dan membawahkan polutan seperti pestisida dan pupuk ke dalam akuifer melalui proses tersebut (Patrick, 2018). Sumur bor tersebut saat tidak digunakan dibiarkan terbuka dan *run-off* yang mengandung kadar timbal akibat penggunaan pupuk dan pestisida dapat mengalir secara langsung ke akuifer tanpa melewati proses absorpsi yang terjadi pada tanah lempung daerah penelitian. Jumlah sumur bor yang terdapat pada daerah penelitian adalah sangat besar, di mana setiap petani memiliki sumur bor mereka masing-masing.

Dari sumber pencemaran timbal potensial yang disebutkan yang paling mungkin merupakan proses perkolasi *run-off* melalui lubang sumur yang tidak tertutup. Jumlah sumur bor pada daerah pertanian sangat besar karena masing-masing petani memiliki kebun dengan luasan yang kecil serta setiap petani memiliki lubang sumur bor sendiri. Selain itu tanah pada daerah penelitian bersifat lempung dengan permeabilitas yang kecil. Hal itu menyebabkan sering terjadinya genangan air pada daerah penelitian yang menyebabkan peningkatan kemungkinan masuknya air permukaan yang mengandung pestisida dan pupuk ke dalam sumur dan akuifer (Pramono, 2007). Selain itu, pada beberapa referensi disebutkan risiko terhadap pencemaran air tanah yang diakibatkan oleh sumur bor yang tidak ditutupi (*uncapped*) (Harris et al., 1914; Lutterodt et al., 2018; Patrick, 2018).

4.11 Pengaruh mineral CaCO_3 terhadap kandungan timbal pada akuifer

Batuan gamping terutama terdiri dari mineral CaCO_3 (Isha et al., 2021). Mineral tersebut dapat terlarut dari batuan gamping saat air berkontak dengan batuan tersebut, meskipun tingkat kelarutan kalsium karbonat tidak terlalu tinggi. CaCO_3 yang terdapat pada air dapat mempengaruhi kadar timbal yang terdapat pada akuifer. CaCO_3 bereaksi dengan air dan membentuk ion Ca^{2+} serta ion CO_3^{2-} . Ion CO_3^{2-} dapat bereaksi dengan timbal pada air dan membentuk senyawa PbCO_3 atau

$\text{Pb}(\text{OH})_2$ yang kemudian mengalami pengendapan dari larutan (Jo et al., 2023). Proses pengendapan tersebut berpotensi untuk menurunkan kadar timbal pada Akuifer Parangtritis.

Pada peta distribusi kadar timbal pada tanah terlihat bahwa kandungan timbal pada daerah timur wilayah penelitian cenderung untuk memiliki nilai yang lebih kecil daripada wilayah daerah penelitian yang lain. Hal itu merupakan indikator bahwa CaCO_3 dari batuan gamping tidak berpengaruh kadar timbal pada daerah penelitian. Misalnya kandungan kalsium karbonat mempengaruhi kadar timbal tersebut, maka kadar timbal tanah seharusnya cenderung mempunyai nilai yang lebih tinggi daripada wilayah daerah penelitian yang lain karena seharusnya terjadi proses presipitasi timbal dari air tanah yang kemudian terakumulasi pada tanah dan meningkatkan kandungan timbal tanah. Indikator yang lain bahwa CaCO_3 dari pegunungan gamping tidak mempengaruhi pada timbal daerah penelitian adalah bahwa tidak dapat terdeteksi kandungan karbonat pada air tanah daerah penelitian (Wilopo et al., 2021b). Hal itu merupakan indikator bahwa tidak terjadi proses pelarutan CaCO_3 yang signifikan pada pegunungan gamping yang terdapat pada sisi timur daerah penelitian.

4.12 Teknologi Remediasi Kontaminasi Timbal pada Tanah Pertanian

Salah satu metode remediasi tanah kontaminasi timbal secara kimiawi merupakan metode *flushing/washing complex*. Pada metode ini reagen kimiawi digunakan untuk mereaksikan timbal menjadi sebuah senyawa kompleks yang kemudian dapat dibilas dari tanah tersebut menggunakan air. Kekurangan metode ini adalah biaya yang tinggi serta penerapan metode ini dapat menyebabkan pembentukan polutan sekunder. Metode remediasi tanah secara kimiawi yang lain merupakan metode *amendment*. Pada metode ini sebuah agen kimiawi ditambahkan ke tanah yang mengurangi ketersediaan biologis timbal dan menurunkan toksisitas timbal (Lina & Xiaojie, 2015). Menurut Hettiarachchi & Pierzynski (2004) metode penambahan stabilisasi timbal pada tanah menggunakan unsur fosforus sebagai *soil amendment* adalah metode yang sangat efektif untuk meremediasikan timbal pada tanah karena unsur fosforus dan timbal cenderung untuk membentuk mineral

pyromorphite yang memiliki tingkat kelarutan yang kecil. Selain itu metode *soil amendment* efektif secara ekonomi dan dapat dilaksanakan dalam waktu yang singkat. Selain itu biomassa seperti kompos atau *biochar* dapat digunakan sebagai *soil amendment*, yang merupakan solusi yang mengurangi mobilitas timbal secara efektif dan memiliki biaya yang kecil (Laidlaw et al., 2017).

Kontaminasi timbal pada tanah juga dapat diolah menggunakan metode remediasi secara fisika. Salah satu metode remediasi secara fisika adalah metode isolasi, pada metode ini dibangun satu dinding di bawah tanah yang menghindari penyebaran kontaminan menuju wilayah yang lain. Metode remediasi tanah yang lain secara fisika adalah metode elektrokinetik. Pada metode ini dua elektrode dimasukkan ke tanah pada lapisan tersaturasi. Kemudian dialirkan sebuah arus listrik melalui lapisan tanah tersaturasi, sehingga kandungan timbal mengumpul pada katode (Lina & Xiaojie, 2015).

Kontaminasi timbal pada tanah dapat juga diremediasikan dengan proses biologis. Salah satu metode remediasi tanah yang menggunakan proses biologis adalah metode fitoremediasi. Pada proses ini tanaman digunakan untuk ekstraksi, imobilisasi dan transformasi logam berat pada tanah. Pada metode remediasi fitoremediasi berdasarkan proses *phytoextraction* di mana kontaminan di serap oleh tanaman dari tanah atau proses *phytostabilization* di mana kontaminan seperti timbal distabilisasikan oleh tanaman dan ketersediaan biologis kontaminan diturunkan. Kelebihan dari fitoremediasi adalah bahwa metode ini merupakan metode yang tidak membutuhkan banyak biaya, ramah lingkungan dan dapat diterima dengan mudah oleh masyarakat. Kekurangan dari metode ini adalah bahwa metode ini membutuhkan waktu yang lama dan bersifat kurang efisien untuk remediasi kontaminan pada lapisan tanah yang lebih dalam (Rigoletto et al., 2020).

Bioremediasi adalah proses remediasi secara biologis yang dapat digunakan untuk mengolah kontaminasi timbal pada tanah. Pada proses bioremediasi, digunakan proses biologis dari bakteri atau fungi untuk remediasi kontaminasi timbal. Bakteri dapat melakukan proses bioremediasi berdasarkan proses bioabsorpsi, presipitasi, kompleksisasi atau melalui reaksi oksidasi-reduksi (Kumar & Singh, 2024). Metode bioremediasi dapat menurunkan ketersediaan biologis

timbal pada tanah. Bakteri dan fungi juga dapat meningkatkan efisiensi fitoremediasi. Efektivitas bioremediasi tergantung pada kondisi lingkungan seperti nilai pH, suhu, keberadaan nutrisi dan keberadaan polutan lain pada tanah (Sevak et al., 2021).

Di Indonesia pada tanah pertanian, dapat dilaksanakan remediasi tanah yang tercemar timbal menggunakan metode fitoremediasi dengan pohon gumitir (*Tagetes erecta* L.). Pohon tersebut dapat mengakumulasi timbal pada akarnya. Hasil fitoremediasi menggunakan pohon tersebut memiliki efisiensi removal kurang dari 50% (Dewi et al., 2022). Di antara lain, tanaman yang dapat digunakan di Indonesia untuk proses fitoremediasi kontaminasi timbal pada tanah merupakan tanaman lidah mertua (*Sansevieria trifasciata*) dan tanaman enceng gondok (*Eichhornia crassipes*). Tanaman tersebut diklasifikasikan sebagai tanaman hiperakumulator (Widyasari, 2021). Metode lain yang digunakan di Indonesia untuk remediasi tanah adalah pencampuran *fly ash* ke tanah untuk menurunkan ketersediaan timbal pada tanah secara efektif (Ginting et al., 2024). Penggunaan *bioslurry* dan *biochar* dapat digunakan sebagai *soil amendment* dan mampu mengurangi kadar timbal pada tanaman pertanian sampai 63%. Selain itu, penggunaan *bioslurry* dan *biochar* dapat meningkatkan kesuburan tanah dan meningkatkan jumlah hasil pertanian. Dengan mengurangi tingkat kelarutan timbal sebesar 88% keduanya *soil amendment* tersebut dapat mengurangi risiko ekologis dari kontaminasi timbal pada tanah (Himawan & Darwanta, 2022).

4.13 Pencemaran timbal pada tanah dan air tanah Negara Jerman

Dibandingkan negara lain di Uni Eropa Jerman merupakan salah satu negara dengan pencemaran timbal pada tanah yang paling signifikan (Tóth et al., 2016). Di Jerman salah satu sumber utama timbal pada air tanah berasal dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA). Akibat pertumbuhan industri pada beberapa tahun terakhir menyebabkan jumlah TPA meningkat sehingga mengakibatkan peningkatan pencemaran air tanah oleh logam berat timbal. Pada TPA, limbah dengan berbagai komposisi dicampurkan, hal itu dapat menyebabkan terjadinya berbagai reaksi kimiawi pada TPA, yang sebagian didukung oleh proses

mikrobiologis. Akibat dari proses tersebut, menghasilkan kandungan timbal pada TPA yang bereaksi menjadi senyawa yang dapat larut dalam air. Kadar air atau air hujan dapat menyebabkan air lindi yang mana jika tidak diolah secara betul dapat menyerap ke tanah dan mencemari air tanah. Salah satu TPA di Jerman yang telah diuji, ditemukan bahwa rata-rata faktor kontaminasi adalah sebesar 6,3. Faktor kontaminasi menunjukkan tingkat pencemaran pada satu lokasi di mana air tanah diukur pada bagian hulu dan hilir sumber pencemaran. Dibandingkan dengan zat pencemar anorganik yang ditemukan pada TPA, di Jerman timbal memiliki faktor kontaminasi yang terbesar ke delapan. Logam berat dengan faktor kontaminasi yang terbesar adalah arsenik dan kadmium. Nilai alamiah timbal rata-rata pada air tanah di Jerman ditemukan adalah sebesar 1,2 µg/L (Lesage & Jackson, 1992).

Sebuah lahan gambut di daerah Jerman Selatan, lahan gambut diuji terhadap sumber timbal, apakah timbal berasal dari sumber geogenik atau antropogenik. Ditemukan berdasarkan analisis isotop timbal bahwa sumber timbal pada lahan gambut tersebut terutama berasal dari sumber geogenik tetapi juga terdapat kandungan timbal yang berasal dari kegiatan pertambangan perak pada abad pertengahan (Le Roux et al., 2005).

Penemuan emisi bahan bakar bertimbal merupakan sumber signifikan pada kontaminasi tanah. Hal itu dapat dilihat pada sebuah penelitian yang berlokasi di Jerman Selatan. Pada lokasi ini ditemukan bahwa timbal dapat menyerap pada lapisan tanah hingga dengan kedalaman 40cm. Dengan analisis isotop unsur timbal dapat ditentukan yakni apakah timbal berasal dari sumber antropogenik atau geogenik. Ditemukan bahwa rasio isotop Pb^{206}/Pb^{204} adalah berbeda berdasarkan sumber timbal. Rasio isotop yang mewakili timbal yang berasal dari emisi bahan bakar ditentukan dari unsur timbal yang berasal dari korosi knalpot kendaraan bermotor (Puchelt et al., 1993).

Selain deposisi atmosferis, sumber timbal yang lain pada tanah di Jerman berupa peluru-peluru yang berasal dari kegiatan perburuan liar serta pupuk anorganik dari kegiatan pertanian, dari ketiga sumber timbal yang paling signifikan merupakan kegiatan pertanian. Untuk menganalisis bahaya kesehatan dari timbal yang terdapat pada tanah diciptakan model matematis yang membantu menghitung

jumlah timbal yang terkandung dalam tanah yang dikonsumsi oleh masyarakat. Perhitungan tersebut menunjukkan jika kadar timbal pada tanah lebih dari besar daripada 5 mg/kg maka penerapan timbal oleh manusia adalah sebesar 10 μ g per hari yang merupakan kadar maksimum. Penerapan timbal dalam jumlah lebih besar dapat menyebabkan gangguan toksis neurologis. Untuk sebuah lahan dapat melebihi nilai batas aman kadar timbal konsumsi manusia dibutuhkan pemakaian pupuk selama 50 -175 tahun pada satu lahan tanah (Schupp et al., 2020).

Sumber pencemaran timbal lain merupakan lahan bekas tambang. Ditemukan pada wilayah di Jerman yang berdekatan dengan bekas pertambangan bahwa 17% remaja memiliki kandungan timbal pada darah yang melebihi standar kesehatan. Remaja yang lebih sering menghabiskan waktunya di luar ruangan atau yang berasal dari keluarga yang menanam sayur sendiri lebih cenderung untuk memiliki kadar timbal darah yang lebih tinggi (Bertram et al., 2023). Pada bekas pertambangan di Wiesloch, sebuah kota di Jerman limbah pertambangan yang berasal dari kegiatan pertambangan yang dilaksanakan lebih dari 2000 tahun yang lalu. Pada bekas tambang tersebut masih terdapat *tailings* dan *slag* yang berpotensi untuk melepaskan timbal kepada lingkungan. Ditemukan bahwa pelapisan limbah bekas tambang tersebut dengan sebuah lapisan lumpur tinja telah menurunkan mobilitas timbal (Stüben et al., 2001).

Permasalahan dengan timbal dan air yang paling signifikan di Jerman adalah pencemaran timbal pada air minum akibat pipa atau aksesoris pipa yang berbahan timbal. Timbal cocok untuk digunakan sebagai bahan pipa karena dapat dibentuk dengan mudah, memiliki titik leleh yang rendah serta tahan terhadap korosi. Sejak tahun 1973 pemasangan pipa atau aksesoris pipa berbahan timbal dilarang. Tetapi pencemaran timbal pada air minum masih diakibatkan oleh pipa berbahan timbal yang dipasang sebelum tahun tersebut (Döhla et al., 2021). Pada sebuah penelitian diambil sampel air kran sebanyak 1.434 sampel pada rumah yang dihuni oleh seorang balita. Ditemukan bahwa kandungan timbal pada air kran 3,1% sampel melebihi kandungan yang disarankan oleh WHO (0,01 mg/L) dan 0,6% dari jumlah sampel melebihi nilai batas ambang baku mutu negara Jerman (0,04 mg/L). Kandungan timbal yang terbesar yang ditemukan adalah sebesar 0,15 mg/L. (B.

Zietz et al., 2001). Pada penelitian lain di Jerman ditemukan bahwa 6,49% dari sampel air kran yang diambil melebihi tingkat rekomendasi WHO serta 2,79% dari sampel yang diuji melebihi baku mutu negara Jerman (Zietz et al., 2007).

4.14 Solusi Teknik

Untuk mengatasi kontaminasi tanah oleh logam timbal pada daerah penelitian dapat diterapkan berbagai metode remediasi tanah yang dibahas pada Bab 4.12. Metode yang paling layak diterapkan pada daerah penelitian merupakan metode *amendement* menggunakan kompos. Metode tersebut memiliki keunggulan berupa penambahan kompos dapat mengurangi mobilitas timbal (Laidlaw et al., 2017) serta penambahan kompos akan mengurangi kebutuhan pupuk kimiawi dengan meningkatkan kesuburan tanah (Singh et al., 2024). Selain itu kompos merupakan sumber daya dengan biaya yang rendah. Metode lain yang dapat diterapkan adalah pemberdayaan petani Desa Parangtritis terkait penggunaan pupuk secara bijak. Pemberdayaan tersebut dapat meliputi pengembangan pengetahuan terkait dampak negatif dari pupuk kimiawi serta meningkatkan keterampilan petani dalam menentukan dosis pupuk dan pestisida sehingga jumlah pupuk dan pestisida yang digunakan dapat dikurangi.

Untuk mengatasi atau mengolah pencemaran air tanah metode yang dapat diterapkan adalah metode *pump and treat*. Pada metode ini air tanah dipompa ke permukaan dan kemudian diolah untuk menghilangkan kandungan timbal pada permukaan melalui proses pengolahan air. Setelah kandungan timbal telah dihilangkan dari air, air tersebut diresapkan ke akuifer kembali (EPA, 1996). Timbal dapat dihilangkan dari air melalui beberapa metode termasuk presipitasi kimia, pertukaran ion, adsorpsi, filtrasi membran dan elektrokimia (Ahmad et al., 2023). Kelebihan metode *pump and treat* adalah bahwa metode tersebut telah lama diterapkan dan memiliki dasar pengetahuan yang luas terkait penggunaannya. Selain itu metode tersebut dapat mengolah air tanah secara efektif dan cepat. Metode ini juga dapat mengolah berbagai zat pencemar. Sedangkan kekurangan dari metode ini adalah bahwa metode tersebut membutuhkan biaya yang besar (EPA, 1996). Karena kebutuhan biaya yang besar, metode *pump and treat* menjadi

kurang layak untuk diterapkan pada daerah penelitian. Untuk memastikan bahwa air limpasan dari daerah pertanian tidak masuk ke akuifer melalui sumur bor irigasi yang tidak terlindungi, penting dilakukan pemberdayaan petani. Pemberdayaan ini bertujuan agar petani memahami pentingnya melindungi sumur bor saat tidak digunakan, guna mencegah limpasan mencemari air tanah.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian ini disimpulkan bahwa:

1. Telah terjadi kontaminasi timbal pada tanah di daerah penelitian yang disebabkan oleh aktivitas pertanian. Hal itu dapat terlihat pada hasil perhitungan EF yang memiliki nilai rata-rata sebesar 2,30 yang menunjukkan sumber timbal yang berasal dari kombinasi faktor geogenik dan antropogenik. Selain itu, I_{geo} dengan nilai rata-rata 0,44 menunjukkan bahwa telah terjadi kontaminasi ringan. Indikator lain yang menunjukkan kontaminasi tanah akibat aktivitas pertanian adalah tingginya kandungan timbal pada tanah serta nilai EF dan I_{geo} yang lebih besar pada lapisan tanah atas daripada lapisan tanah bawah untuk masing-masing lokasi pengambilan sampel. Rata-rata nilai kandungan timbal untuk lapisan tanah atas juga melebihi tiga kali lipat BGV yang ditentukan. Kegiatan pertanian tidak menjadi penyebab pencemaran timbal pada air tanah daerah penelitian melalui proses infiltrasi. Hal ini disimpulkan berdasarkan sifat lempung tanah yang mendominasi daerah penelitian serta nilai pH tanah yang netral. Kedua faktor tersebut mengurangi kemampuan timbal untuk perkolasi dari permukaan sampai akuifer. Namun, *run-off* yang tercemar timbal dari penggunaan pupuk dan pestisida berpotensi mencemari air tanah melalui sumur bor irigasi yang tidak terlindungi.
2. Berdasarkan hasil pemodelan Indeks Saturasi untuk mineral *anglesite* dan *cerussite* yang menunjukkan bahwa kedua mineral tersebut tidak berinteraksi dengan air tanah disimpulkan bahwa kemungkinan besar kondisi geologi tidak berdampak pada terjadinya pencemaran air tanah. Kondisi geologis tidak mempengaruhi pencemaran air tanah di daerah penelitian.

3. Kadar timbal yang ditemukan pada tanah daerah penelitian berkisar antara 6,18 hingga 23,21 mg/kg dengan rata-rata sebesar 14,82 mg/kg. Nilai ini masih di bawah nilai ambang batas baku mutu tanah untuk lahan pertanian.

5.2 Saran

Berdasarkan kajian penelitian ini terdapat beberapa hal yang dapat dianalisis lebih rinci untuk memperoleh hasil penelitian yang lebih baik yakni;

1. Analisis terkait kinerja muka air tanah Desa Parangtritis dan muka air Sungai Opak serta pengaruh dari musim hujan dan musim kering terhadap muka air tersebut.
2. Analisis potensi absorpsi logam berat oleh tanah lempung yang terdapat pada daerah penelitian.
3. Analisis terkait sumur bor petani daerah penelitian dan rembesan *run-off* ke akuifer lokal melalui sumur bor yang tidak dilindungi.
4. Analisis pola penggunaan pupuk dan pestisida pada daerah penelitian pada masing-masing musim penanam.

DAFTAR PUSTAKA

- Adegoke, J. A., & Babatunde, E. G. (2012). Lead Adsorption in Clay and Its Application. *EJGE*, 17.
- Adjia, H. Z., Villieras, F., & Kanga, R. (2019). Adsorption Capacity and Mineralogical and Physico-Chemical Characteristics of Alluvial Clay from Far-North Cameroon. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 8(06). www.ijert.org
- Ahmad, F., & Liu, P. (2020). (Ascorb)ing pb neurotoxicity in the developing brain. In *Antioxidants* (Vol. 9, Issue 12, pp. 1–30). MDPI. <https://doi.org/10.3390/antiox9121311>
- Ahmad, I., Asad, U., Maryam, L., Masood, M., Saeed, M. F., Jamal, A., & Mubeen, M. (2023). Treatment Methods for Lead Removal from Wastewater. In *Environmental Science and Engineering: Vol. Part F1251* (pp. 197–226). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. https://doi.org/10.1007/978-3-031-37327-5_10
- Andarwanto, N. (2020). *Daftar Isian Potensi Desa dan Kelurahan*.
- Antika, S. P., Sejati, S. P., & Ibrahim, M. H. (2024). Groundwater quality in coastal area: A case study in Parangtritis Village, Bantul, Yogyakarta, Indonesia. *Jurnal Pendidikan Geografi: Kajian, Teori, Dan Praktek Dalam Bidang Pendidikan Dan Ilmu Geografi*, 29(1), 28. <https://doi.org/10.17977/um017v29i12024p28-42>
- Appelo, C. A. J., & Postma, Dieke. (2005). *Geochemistry, groundwater and pollution*. Balkema.
- Ashkan, M. F. (2023). Lead: Natural Occurrence, Toxicity to Organisms and Bioremediation by Lead-degrading Bacteria: A Comprehensive Review. In *Journal of Pure and Applied Microbiology* (Vol. 17, Issue 3, pp. 1298–1319). *Journal of Pure and Applied Microbiology*. <https://doi.org/10.22207/JPAM.17.3.26>
- Badan Pusat Statistik Kabupaten Bantul. (2023). *Kabupaten Bantul Dalam Angka 2024*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2008). *SNI 6989.58:2008 Air dan air limbah-Bagian 58: Metoda pengambilan contoh air tanah*.
- Badan Standardisasi Nasional. (2009). *SNI 6989.70:2009 Air dan air limbah - Bagian 70: Cara uji sulfida dengan biru metilen secara spektrofotometri*.

- Barbieri, M. (2016). The Importance of Enrichment Factor (EF) and Geoaccumulation Index (Igeo) to Evaluate the Soil Contamination. *Journal of Geology & Geophysics*, 5(1). <https://doi.org/10.4172/2381-8719.1000237>
- Bertram, J., Ramolla, C., Esser, A., Schettgen, T., Fohn, N., Steib, J., & Kraus, T. (2023). Blood lead monitoring in a former mining area in Euskirchen, Germany: results of a representative random sample in 3- to 17-year-old children and minors. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(8), 20995–21009. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23632-2>
- Binh, N. T. L., Hoang, N. T., Truc, N. T. T., Khang, V. D., & Le, H. A. (2021). Estimating the Possibility of Lead Contamination in Soil Surface due to Lead Deposition in Atmosphere. In *Journal of Nanomaterials* (Vol. 2021). Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2021/5586951>
- Boës, X., Rydberg, J., Martinez-Cortizas, A., Bindler, R., & Renberg, I. (2011). Evaluation of conservative lithogenic elements (Ti, Zr, Al, and Rb) to study anthropogenic element enrichments in lake sediments. *Journal of Paleolimnology*, 46(1), 75–87. <https://doi.org/10.1007/s10933-011-9515-z>
- Bourennane, H., Douay, F., Sterckeman, T., Villanneau, E., Ciesielski, H., King, D., & Baize, D. (2010). Mapping of anthropogenic trace elements inputs in agricultural topsoil from Northern France using enrichment factors. *Geoderma*, 157(3–4), 165–174. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.009>
- Brindha, K., Paul, R., Walter, J., Tan, M. L., & Singh, M. K. (2019). BrindaTrace metals contamination in groundwater and implications on human health: comprehensive assessment using hydrogeochemical and geostatistical methods. *Environ Geochem Health*, 42.
- Budianta, W. (2012). LEAD CONTAMINATION IN SOIL OF YOGYAKARTA CITY, INDONESIA. *J. SE Asian Appl. Geol*, 4(2), 90–98.
- Bundesamt für Justiz. (2010). *Verordnung zum Schutz des Grundwassers (Grundwasserverordnung - GrwV)*.
- Bundesamt für Justiz. (2021). *Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)*.
- Camila, A. N., Siswoyo, H., & Hendrawan, A. P. (2023). Penentuan Tingkat Kesuburan Tanah Pada Lahan Pertanian di Kelurahan Bandulan Kecamatan Sukun Kota Malang Berdasarkan Parameter Kimia. *Jurnal Sains Dan Edukasi Sains*, 6(1), 28–33. <https://doi.org/10.24246/juses.v6i1p28-33>
- Canadian Council of Ministers of the Environment. (1999). *Canadian Soil Quality Guidelines for the Protection of Environmental and Human Health*.

- Collin, M. S., Venkatraman, S. K., Vijayakumar, N., Kanimozhi, V., Arbaaz, S. M., Stacey, R. G. S., Anusha, J., Choudhary, R., Lvov, V., Tovar, G. I., Senatov, F., Koppala, S., & Swamiappan, S. (2022). Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects on human: A review. In *Journal of Hazardous Materials Advances* (Vol. 7). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.hazadv.2022.100094>
- Collin, S., Baskar, A., Geevarghese, D. M., Ali, M. N. V. S., Bahubali, P., Choudhary, R., Lvov, V., Tovar, G. I., Senatov, F., Koppala, S., & Swamiappan, S. (2022). Bioaccumulation of lead (Pb) and its effects in plants: A review. *Journal of Hazardous Materials Letters*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.hazl.2022.100064>
- Dewi, I. G. A. K. S. P., Sunariani, N. L. G. A., & Suprihatin, I. E. (2022). Remediasi Tanah Tercemar Timbal (Pb) dan Akumulasinya pada Tanaman Gumitir (*Tagetes erecta* L.). *Jurnal Kimia*, 162. <https://doi.org/10.24843/jchem.2022.v16.i02.p05>
- Dewi, T., Martono, E., Hanudin, E., & Harini, R. (2022). Impact of agrochemicals application on lead and cadmium concentrations in shallot fields and their remediation with biochar, compost, and botanical pesticides. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1109(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1109/1/012050>
- Di Giuseppe, D., Vittori Antisari, L., Ferronato, C., & Bianchini, G. (2014). New insights on mobility and bioavailability of heavy metals in soils of the Padanian alluvial plain (Ferrara Province, northern Italy). *Chemie Der Erde*, 74(4), 615–623. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2014.02.004>
- Dinas Ketahanan Pangan dan Pertanian Kabupaten Ngawi. (2023). *Budidaya Cabai Merah*. <https://Pertanian.Ngawikab.Go.Id/2023/02/10/Budidaya-Cabai-Merah/>.
- Döhla, M., Jaensch, A., Döhla, C., Voigt, A., Exner, M., & Färber, H. (2021). Lead in drinking water—an old problem, a new EU directive. *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz*, 64(4), 501–508. <https://doi.org/10.1007/s00103-021-03292-2>
- Elnajdi, A., Berland, A., Haeft, J., & Dowling, C. (2023). Influence of Soil pH, Organic Matter, and Clay Content on Environmentally Available Lead in Soils: A Case Study in Muncie, Indiana, USA. *Open Journal of Soil Science*, 13(10), 414–430. <https://doi.org/10.4236/ojss.2023.1310019>
- EPA. (1996). *Pump and Treat Ground-Water Remediation A Guide for Decision Makers and Practitioners*. <https://www.researchgate.net/publication/319963219>

- Eugenio, R. N., McLaughlin, M. J. ., & Pennock, D. John. (2018). *Soil pollution : a hidden reality*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Fitrianah, L., Agus Rachmad Purnama, dan, & Sidoarjo, U. (2019). Sebaran Timbal pada Tanah di Areal Persawahan Kabupaten Sidoarjo. In *Journal of Research and Technology* (Vol. 5, Issue 2).
- Flora, G., Gupta, D., & Tiwari, A. (2012). Toxicity of lead: A review with recent updates. In *Interdisciplinary Toxicology* (Vol. 5, Issue 2, pp. 47–58). <https://doi.org/10.2478/v10102-012-0009-2>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (23 C.E.). *Standard operating procedure for quasi total elements in soil by acid digestion, including heavy metals*. <http://www.wipo.int/amc/en/mediation/rules>
- Ghazy, S. E., & Ragab, A. H. (2007). Removal of lead from water samples by sorption onto powdered Limestone. *Separation Science and Technology*, 42(3), 653–667. <https://doi.org/10.1080/01496390601070166>
- Gholizadeh, A., Saberioon, M., Ben-Dor, E., & Borůvka, L. (2018). Monitoring of selected soil contaminants using proximal and remote sensing techniques: Background, state-of-the-art and future perspectives. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 48(3), 243–278. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1447717>
- Ginting, I. F., Darmawan, & Indriyati, L. T. (2024). Remediasi Tanah Tercemar Timbal dan Kadmium Menggunakan Fly Ash dan Bahan Organik. *Jurnal Ilmu Tanah Dan Lingkungan*, 26(2), 61–65. <https://doi.org/10.29244/jitl.26.2.61-65>
- Harris, B. L., Hoffman, D. W., & Mazac, F. J. (1914). *Reducing the Risk of Ground Water Contamination by Improving Wellhead Management and Conditions*.
- Hatree, R., & Veizer, J. (1982). Lead and Zinc Distribution in Carbonate Rock. *Chemical Geology*, 37.
- Hettiarachchi, G. M., & Pierzynski, G. M. (2004). Soil lead bioavailability and in situ remediation of lead-contaminated soils: A review. *Environmental Progress*, 23(1), 78–93. <https://doi.org/10.1002/ep.10004>
- Himawan, & Darwanta. (2022). Pengaruh Remediasi Biochar dan Bioslurry Tanah Tercemar Terhadap Kadar Timbal Terlarut dan Bioavailabilitasnya pada Sawi Hijau (*Brassica rapa*). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(2), 335–343. <https://doi.org/10.14710/jil.20.2.335-343>
- Hizli, S., Aybike Gül, Gören, A. Y., & Memhmet Koby. (2023). Identifying Geogenic and Anthropogenic Aluminium Pollution on Different Spatial Distributions and Removal of Natural Waters and Soil in Canakkale, Turkey. *ACS Omega*, 8.

- International Atomic Energy Agency. (2004). *IAEA-TECDOC-1415 Soil sampling for environmental contaminants*. International Atomic Energy Agency.
- Isa, L. O. S., Adji, T. N., & Purnama, I. L. S. (2022). Analysis of Groundwater Potential in the Coastal Area of Parangtritis using Geoelectrical VES Method. *Media Komunikasi Geografi*, 23(2), 188–197. <https://doi.org/10.23887/mkg.v23i2.51539>
- Isha, M., Nabila Syuhada, Mohd Kusin, Faradiella, Ahmad Kamal, Nurfakhira Meor, Syed Hasan, Sharifah Nur Munirah, & Molahid, V. L. M. (2021). Geochemical and mineralogical assessment of sedimentary limestone mine waste and potential for mineral carbonation. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(5), 2065–2080. <https://doi.org/10.1007/s10653-020-00784-z>
- Ismiyati, Marlita, D., & Saidah, D. (2014). Pencemaran Udara Akibat Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor. *Jurnal Manajemen Transportasi & Logistik*, 01.
- Jo, Y.-H., Jeong, W.-G., Park, J., & Baek, K. (2023). Partially calcined CaCO₃ for remediating multi-heavy metals-contaminated groundwater. *Chemical Engineering Journal*, 471, 144652. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.144652>
- Kalurahan Parangtritis. (2019). *Potensi Pertanian DI Parangtritis*. <https://Parangtritis.Bantulkab.Go.Id/First/Artikel/50-Potensi-Pertanian-DI-Parangtritis>.
- Kazapoe, R., & Arhin, E. (2021). Determination of local background and baseline values of elements within the soils of the Birimian Terrain of the Wassa Area of Southwest Ghana. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 5(3), 199–208. <https://doi.org/10.1080/24749508.2019.1705644>
- Kicińska, A., Pomykała, R., & Izquierdo-Diaz, M. (2022). Changes in soil pH and mobility of heavy metals in contaminated soils. *European Journal of Soil Science*, 73(1). <https://doi.org/10.1111/ejss.13203>
- Komarudin, D., Hidayat, F., Kurniayu Putri, D., Raya Kedoya Al Kamal No, J., Selatan, K., & Jeruk Jakarta, K. (2021). Analisis Kadar Cemaran Logam Berat Timbal (Pb) dan Kadmium (Cd) Pada Air Tanah Di Perumahan Perumnas Bekasi. *IONTech*, 02(01), 2745–7206. <http://iontech.ista.ac.id/index.php/iontech>
- Kumaladewi, R. A. (2020). PENGELOLAAN DAN DAMPAK LIMBAH ELEKTRONIK DI INDONESIA (STUDI KASUS PENGELOLAAN LIMBAH DI KAMPUNG CINANGKA DAN KAMPUNG CURUG). *Prosiding Seminar Nasional Pascasarjana Universitas Negeri Jakarta*.
- Kumar, K., & Singh, D. (2024). Toxicity and bioremediation of the lead: a critical review. In *International Journal of Environmental Health Research* (Vol. 34,

Issue 4, pp. 1879–1909). Taylor and Francis Ltd.
<https://doi.org/10.1080/09603123.2023.2165047>

- Laidlaw, M. A. S., Filippelli, G. M., Brown, S., Paz-Ferreiro, J., Reichman, S. M., Netherway, P., Truskewycz, A., Ball, A. S., & Mielke, H. W. (2017). Case studies and evidence-based approaches to addressing urban soil lead contamination. *Applied Geochemistry*, 83, 14–30. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.02.015>
- Le Roux, G., Aubert, D., Stille, P., Krachler, M., Kober, B., Cheburkin, A., Bonani, G., & Shotyky, W. (2005). Recent atmospheric Pb deposition at a rural site in southern Germany assessed using a peat core and snowpack, and comparison with other archives. *Atmospheric Environment*, 39(36), 6790–6801. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.07.026>
- Lesage, S., & Jackson, R. E. (1992). *Groundwater Contamination and Analysis Hazardous Waste Sites*. Mark Dekker Inc.
- Lestari, I., Agustina, H., & Soesilo, T. E. B. (2019). Analysis of lead contamination in soil (case: Pesarean village, Tegal district area). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 306(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/306/1/012024>
- Lina, L., & Xiaojie, S. (2015). Review on the Technology and Application of Lead Contaminated Soil Remediation. *International Symposium on Material, Energy and Environment Engineering*.
- Liu, F., Rossiter, D. G., Zhang, G. L., & Li, D. C. (2020). A soil colour map of China. *Geoderma*, 379. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114556>
- Luthfiah, Z. D., Kimia, T., & Veteran Yogyakarta, U. (2024). Artikel Review: “Kondisi Terkini Kualitas Air Sungai di Daerah Istimewa Yogyakarta” Review Article: “Recent Condition of River Water Quality in Special Region of Yogyakarta.” *Jurnal Pengendalian Pencemaran Lingkungan (JPPL)*, 6(1).
- Lutterodt, G., van de Vossenberg, J., Hoiting, Y., Kamara, A. K., Oduro-Kwarteng, S., & Foppen, J. W. A. (2018). Microbial groundwater quality status of hand-dug wells and boreholes in the Dodowa area of Ghana. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(4). <https://doi.org/10.3390/ijerph15040730>
- Mandal, S., Bhattacharya, S., & Paul, S. (2022). Assessing the level of contamination of metals in surface soils at thermal power area: Evidence from developing country (India). *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 4, 37–49. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2021.11.003>

- Mehlhorn, P., Newman, B., & Haberzettl, T. (2024). Comparison of Different Normalisers for Identifying Metal Enrichment of Sediment: A Case Study from Richards Bay Harbour, South Africa. *Sustainability of Southern African Ecosystems under Global Change, Ecological Studies*, 248, 787–814. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10948-5_27
- Menteri Pertanian. (2007). *Permentan No.40 Th. 2007 TENTANG REKOMENDASI PEMUPUKAN N, P, DAN K PADA PADI SAWAH SPESIFIK LOKASI*.
- Mikkonen, H. G., Clarke, B. O., Dasika, R., Wallis, C. J., & Reichman, S. M. (2017). Assessment of ambient background concentrations of elements in soil using combined survey and open-source data. *Science of the Total Environment*, 580, 1410–1420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.106>
- Mohsin, T. (2022). Effects of Lead on Human Health: A Review. *Journal of Environmental and Analytical Toxicology*, 12(12). <https://doi.org/10.37421/2161-0525.2022.12.665>
- Murtianto, H., Lin, S. W., & Chen, Z.-E. (2017). THE STUDY OF WATER QUALITY FOR DEVELOPING TOURISM IN PARANGTRITIS COASTAL AREA, INDONESIA. *IJRDO*, 3(5).
- National Academies of Sciences, E. and M. (2017). *Investigative Strategies for Lead-Source Attribution at Superfund Sites Associated with Mining Activities*. National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/24898>
- Natural Ressource Conservation Service. (n.d.). *Soil Health - pH*.
- Nugroho, A. T., Wicaksono, D., Nurjani, E., Vokasi, S., & Gadjah Mada, U. (2014). Identifikasi Potensi Airtanah pada Area dengan Beragam Bentuklahan Menggunakan Beberapa Parameter Lapangan dan Pendekatan SIG di Kawasan Parangtritis, DIY. In *Citation: Seminar Nasional Teknologi Terapan*.
- Operacz, A., Bigaj, A., Hap, K., & Kotowski, T. (2022). The Effect of Sample Preparation and Measurement Techniques on Heavy Metals Concentrations in Soil: Case Study from Kraków, Poland, Europe. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/app12042137>
- Panda, B., Chidambaram, S., Thivya, C., Thilagavathi, R., Tirumalesh, K., & Devaraj, N. (2020). An attempt to determine the behavior of metals and their dependent thermodynamic saturation states in the groundwater along mountain front and riparian zone. *Environmental Earth Sciences*, 79(1). <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8685-2>
- Patočka, J. (2008). ORGANIC LEAD TOXICOLOGY. *ACTA MEDICA*, 51(4), 209–213.

- Patrick, R. J. (2018). Adapting to climate change through source water protection: Case studies from Alberta and Saskatchewan, Canada. *International Indigenous Policy Journal*, 9(3). <https://doi.org/10.18584/iipj.2018.9.3.1>
- Pramono, H. (2007). Fisiografi Parangtritis dan Sekitarnya. *Geomedia*, 5.
- Prasetyawati, N. M. D., Siaka, I. M., & Rita, W. S. (2021). KANDUNGAN LOGAM Pb DAN Cu DALAM TANAMAN BAYAM DAN BIOAVAILABILITASNYA DALAM TANAH PERTANIAN DENGAN PEMBERIAN PUPUK NPK. *Cakra Kimia (Indonesian E-Journal of Applied Chemistry)*, 8(2).
- Puchelt, H., Kramar, U., Cumming, G. L., Krstic, D., Nöltner, T., Schöttle, M., & Schweikle, V. (1993). Anthropogenic Pb contamination of soils, southwest Germany. *Applied Geochemistry*, 8, 71–73. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(09\)80014-0](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(09)80014-0)
- Raj, K., & Das, A. P. (2023). Lead pollution: Impact on environment and human health and approach for a sustainable solution. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 5, 79–85. <https://doi.org/10.1016/j.enceco.2023.02.001>
- Reimann, C., & de Caritat, P. (2017). Establishing geochemical background variation and threshold values for 59 elements in Australian surface soil. *Science of the Total Environment*, 578, 633–648. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.010>
- Ren, Y. S., Ilyas, M., Xu, R. Z., Ahmad, W., & Wang, R. (2022). Concentrations of Lead in Groundwater and Human Blood in the Population of Palosai, a Rural Area in Pakistan: Human Exposure and Risk Assessment. *Adsorption Science and Technology*, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/8341279>
- Rezhandi, R. T. R. (2019). *ANALISIS KUALITAS AIR TANAH BERDASARKAN KANDUNGAN LOGAM BERAT (Pb, Cu, Cr, Cd) DI KAWASAN GUMUK PASIR, BANTUL, YOGYAKARTA*. Universitas Islam Indonesia.
- Rianti, M., Okalia, D., & Ezward Chairil. (2021). PENGARUH BERBAGAI VARIETAS DAN DOSIS UREA TERHADAP TINGGI DAN JUMLAH DAUN BAWANG MERAH (*Allium ascalonicum*. L). *Jurnal Green Swarnadwipa*.
- Rigoletto, M., Calza, P., Gaggero, E., Malandrino, M., & Fabbri, D. (2020). Bioremediation methods for the recovery of lead-contaminated soils: A review. In *Applied Sciences (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 10). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/app10103528>

- Ruslinda, Y., Gunawan, H., Goembira, F., & Wulandari, S. (2016). Pengaruh Jumlah Kendaraan Berbahan Bakar Bensin Terhadap Konsentrasi Timbal (Pb) di Udara Ambien Jalan Raya Kota Padang. In *Seminar Nasional Sains dan Teknologi Lingkungan II*.
- Santoso. (2023). EVALUASI PENGUJIAN KUALITAS AIR SUNGAI OPAK DI KABUPATEN BANTUL PERIODE BULAN JANUARI TAHUN 2022. *Jurnal Rekayasa Lingkungan*, 23.
- Schiff, K. C., & Weisberg, S. B. (1999). Iron as a reference element for determining trace metal enrichment in Southern California coastal shelf sediments. *Marine Environmental Research*, 48. www.elsevier.com/locate/marenvrev
- Schupp, T., Damm, G., Foth, H., Freyberger, A., Gebel, T., Gundert-Remy, U., Hengstler, J. G., Mangerich, A., Partosch, F., Röhl, C., & Wollin, K. M. (2020). Long-term simulation of lead concentrations in agricultural soils in relation to human adverse health effects. *Archives of Toxicology*, 94(7), 2319–2329. <https://doi.org/10.1007/s00204-020-02762-x>
- Sejati, S. P., & Prayoga, R. E. (2023). Analysis on unconfined groundwater availability during dry and rainy season using dynamic approach in Ngemplak, Sleman, Yogyakarta, Indonesia. *Jurnal Pendidikan Geografi: Kajian, Teori, Dan Praktek Dalam Bidang Pendidikan Dan Ilmu Geografi*, 28(1), 38. <https://doi.org/10.17977/um017v28i12023p38-51>
- Sevak, P. I., Pushkar, B. K., & Kapadne, P. N. (2021). Lead pollution and bacterial bioremediation: a review. In *Environmental Chemistry Letters* (Vol. 19, Issue 6, pp. 4463–4488). Springer Science and Business Media Deutschland GmbH. <https://doi.org/10.1007/s10311-021-01296-7>
- Singh, C. K., Rina, K., Singh, R. P., & Mukherjee, S. (2014). Geochemical characterization and heavy metal contamination of groundwater in Satluj River Basin. *Environmental Earth Sciences*, 71(1), 201–216. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2424-x>
- Singh, S., Devi, N. B., D, D., Kumar, A., Singh, S., Tyagi, G., Nath, A., & Kumar, A. (2024). Soil fertility management: Role of organic amendments and bio-fertilizers: A review. *International Journal of Research in Agronomy*, 7(12), 766–772. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2024.v7.i12j.2253>
- Soltani-Gerdefaramarzi, S., Ghasemi, M., & Ghanbarian, B. (2021). Geogenic and anthropogenic sources identification and ecological risk assessment of heavy metals in the urban soil of Yazd, central Iran. *PLoS ONE*, 16(11 November). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0260418>

- Souisa, G. V. (2017). KONSENTRASI LOGAM BERAT CADMIUM DAN TIMBAL PADA AIR DAN SEDIMEN DI TELUK AMBON. 2-*TRIK: Tunas-Tunas Riset Kesehatan*, 7. <http://2trik.jurnalelektronik.com/index.php/2trik>
- Srivastav, A. L. (2020). Chemical fertilizers and pesticides: role in groundwater contamination. In *Agrochemicals Detection, Treatment and Remediation: Pesticides and Chemical Fertilizers* (pp. 143–159). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-103017-2.00006-4>
- Stüben, D., Berner, Z., Kappes, B., & Puchelt, H. (2001). ENVIRONMENTAL MONITORING OF HEAVY METALS AND ARSENIC FROM Ag-Pb-Zn MINING A Case Study over Two Millennia. *Environmental Monitoring and Assessment*, 70.
- Sujatmiko, A. (2009). *Kajian Penegelolaan Air Tanah* [Tesis Magister]. Universitas Diponegoro.
- Sun, Y., Li, H., Guo, G., Semple, K. T., & Jones, K. C. (2019). Soil contamination in China: Current priorities, defining background levels and standards for heavy metals. *Journal of Environmental Management*, 251. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109512>
- Sunarto, Marfai, M. A., Cahyadi, A., Murti, S. H., Fatchurohman, H., & Malawani, M. N. (2017). *KARAKTERISTIK AKUIFER WILAYAH KEPESISIRAN PARANGTRITIS, KABUPATEN BANTUL*. <https://doi.org/10.31227/osf.io/9j3xz>
- Tapia Nunez, L. (2015). *Registro Oficial - Edicion Especial N° 387*.
- Tóth, G., Hermann, T., Da Silva, M. R., & Montanarella, L. (2016). Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International*, 88, 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017>
- Uduma, A. U. (2014). Aluminum as a Reference Element for the Elucidation of Pb Enrichment /Depletion in Selected Arable Soils of Nigeria. In *International organization of Scientific Research: Vol. ISSN*. www.iosrjen.org
- Ullah, Z., Rashid, A., Ghani, J., Nawab, J., Zeng, X. C., Shah, M., Alrefaei, A. F., Kamel, M., Aleya, L., Abdel-Daim, M. M., & Iqbal, J. (2022). Groundwater contamination through potentially harmful metals and its implications in groundwater management. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.1021596>
- Ustiatik, R., Pertiwi, B. L. S., Nugroho, R. M. Y. A. P., Albarki, G. K., ‘Azizah, S. N., Ariska, A. P., Nuraini, Y., & Kurniawan, S. (2024). Farmers’ Bussiness as Usual Increase Lead (Pb) Level in the Soil: a Case Study Horticulture Land in

- Batu, Indonesia. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 10(1), 219–228.
<https://doi.org/10.29303/jppipa.v10i1.4719>
- van Huyssteen, C. W., le Roux, P. A. L., Hensley, M., & Zere, T. B. (2007). Duration of water saturation in selected soils of weatherley, South Africa. *South African Journal of Plant and Soil*, 24(3), 152–160.
<https://doi.org/10.1080/02571862.2007.10634799>
- Verity, M. A. (1990). Comparative Observations on Inorganic and Organic Lead Neurotoxicity. In *Environmental Health Perspectives* (Vol. 89).
- Wahyuni, E. T., Triyono, S., Suherman, D., Kimia, J., Mipa, F., Sekip, U., & Yogyakarta, U. (2012). PENENTUAN KOMPOSISI KIMIA ABU VULKANIK DARI ERUPSI GUNUNG MERAPI (Determination of Chemical Composition of Volcanic Ash from Merapi Mountain Eruption). *J. MANUSIA DAN LINGKUNGAN*, 19(2), 150–159.
- Wahyuningsih, Dwi Sri, Edwin Maulana, Erwin Isna Megawati, Zheni Setyaningsih, Farid Ibrahim, Mega Dharma Putra, Anggara Setyabawana Putra, Ayu Ratna Krismanti, Budi Susanta Gunadi, & Yudianto Sri Tuti Pujiwati. (2016). *BUKU DESKRIPSI PETA DESA PARANGTRITIS* (Wiwin Ambarwulan & Theresia Retno Wulan, Eds.). Parangtritis Geomaritime Science Park.
- Wahyuningsih, Dwi Sri, Edwin Maulana, Erwin Isna Megawati, Zheni Setyaningsih, Farid Ibrahim, Mega Dharma Putra, Anggara Setyabawana Putra, Ayu Ratna Krismanti, Gunadi Yudianto, Budi Susanta, & Sri Tuti Pujiwati. (2016). *BUKU DESKRIPSI PETA DESA PARANGTRITIS* (Wiwin Ambarwulan & Theresia Retno Wulan, Eds.). Parangtritis Geomaritime Science Park.
- Widyasari, N. L. (2021). Kajian Tanaman Hiperakumulator pada Teknik Remediasi Lahan Tercemar Logam Berat. *JURNAL ECOCENTRISM*.
- Wilopo, W., Risanti, Susatio, R., & Putra, D. P. E. (2021a). Seawater intrusion assessment and prediction of sea-freshwater interface in Parangtritis coastal aquifer, South of Yogyakarta Special Province, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 8(3), 2709–2718.
<https://doi.org/10.15243/JDMLM.2021.083.2709>
- Wilopo, W., Risanti, Susatio, R., & Putra, D. P. E. (2021b). Seawater intrusion assessment and prediction of sea-freshwater interface in Parangtritis coastal aquifer, South of Yogyakarta Special Province, Indonesia. *Journal of Degraded and Mining Lands Management*, 8(3), 2709–2718.
<https://doi.org/10.15243/JDMLM.2021.083.2709>

Zietz, B., Dassel De Vergara, J., Kevekordes, S., & Dunkelberg, H. (2001). Lead contamination in tap water of households with children in Lower Saxony, Germany. In *The Science of the Total Environment* (Vol. 275).

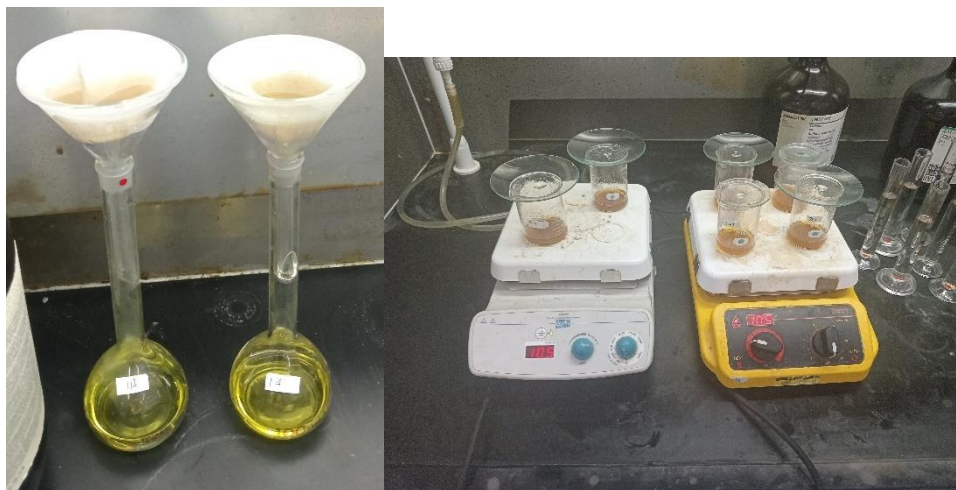
Zietz, B. P., Laß, J., & Suchenwirth, R. (2007). Assessment and management of tap water lead contamination in Lower Saxony, Germany. *International Journal of Environmental Health Research*, 17(6), 407–418. <https://doi.org/10.1080/09603120701628719>

LAMPIRAN

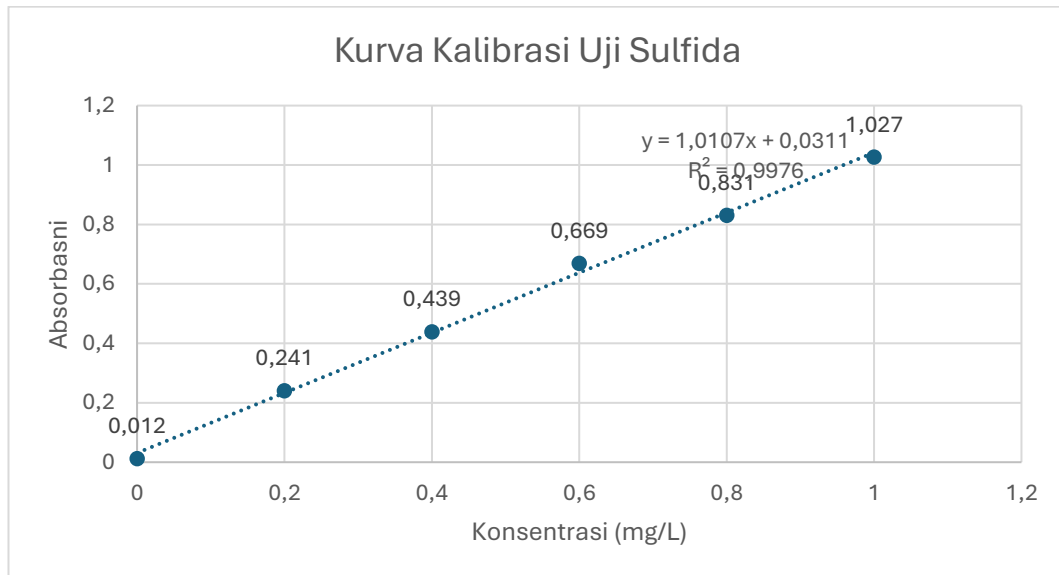
Lampiran 1: Foto Pengambilan Sampel



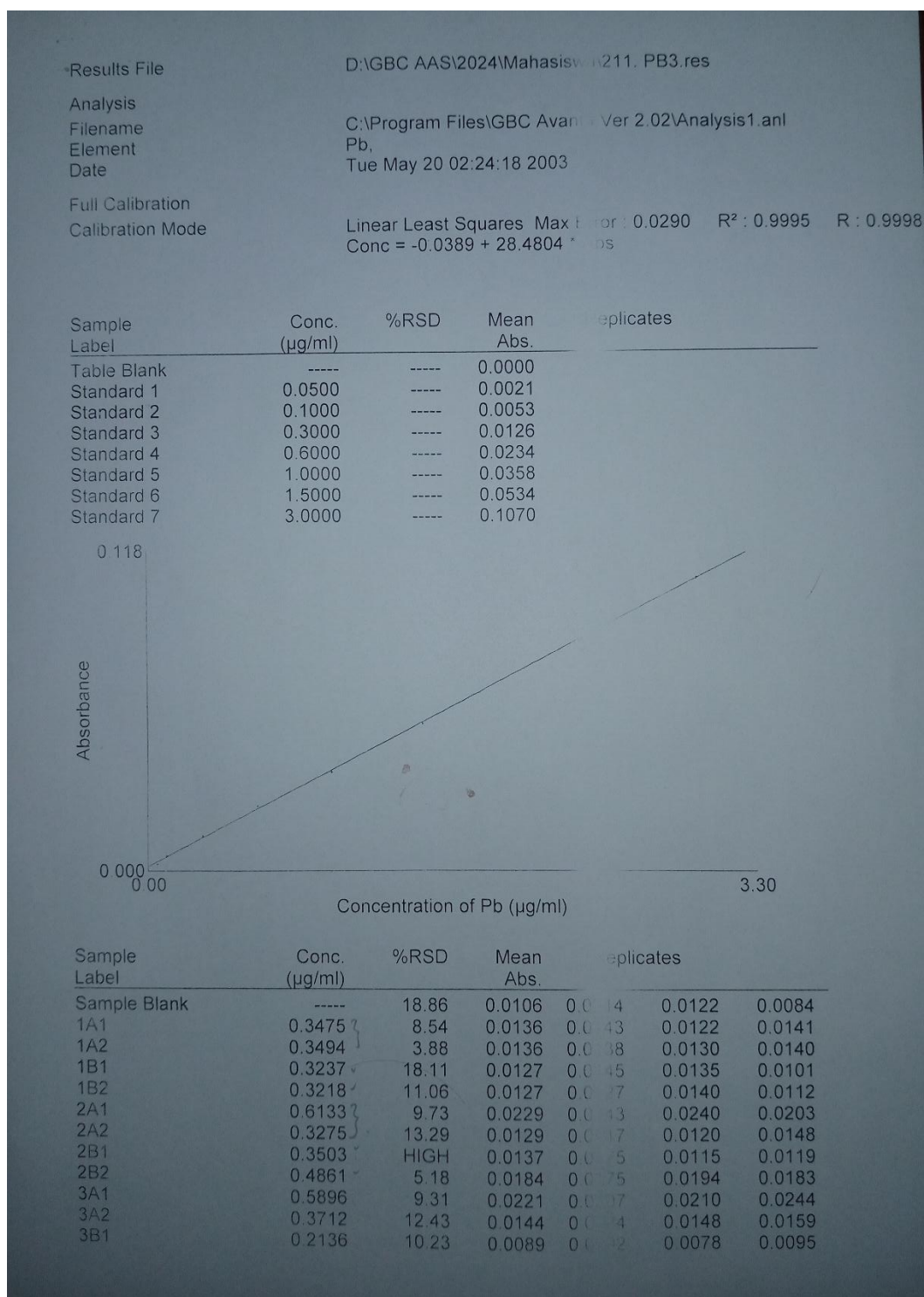
Lampiran 2: Foto Uji Laboratorium



Lampiran 3: Kurva Kalibrasi Pengujian Kadar Sulfida



Lampiran 4: Hasil SSA



Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates		
3B2	0.2810	13.70	0.0112	0.0116	0.0095	0.0125
4A1	0.2801	13.52	0.0112	0.0129	0.0105	0.0101
4A2	0.2440	18.48	0.0099	0.0107	0.0112	0.0078
4B1	0.2184	HIGH	0.0090	0.0069	0.0136	0.0065
4B2	0.1291	14.42	0.0059	0.0059	0.0067	0.0050
5A1	0.1804	HIGH	0.0077	0.0062	0.0098	0.0050
5A2	0.1386	HIGH	0.0062	0.0140	0.0060	0.0086
5B1	0.1775	HIGH	0.0076	0.0162	0.0100	0.0065
5B2	0.0978	HIGH	0.0048	0.0126	0.0042	0.0075
6A1	0.0703	15.87	0.0038	0.0142	0.0041	0.0031
6A2	0.1567	8.28	0.0069	0.0173	0.0070	0.0062
6B1	0.1899	HIGH	0.0080	0.0154	0.0106	0.0080
6B2	0.1595	15.75	0.0070	0.0178	0.0057	0.0073
7A1	0.1291	HIGH	0.0059	0.0141	0.0067	0.0068
7A2	0.1253	HIGH	0.0058	0.0154	0.0072	0.0046
7B1	0.1329	HIGH	0.0060	0.0157	0.0042	0.0081
7B2	0.2203	HIGH	0.0091	0.0110	0.0057	0.0105

Results File

D:\GBC AAS\2024\Mahasiswa\210.FE.res

Analysis

Filename

C:\Program Files\GBC Avanta\Ver 2.02\Analysis1.anl

Element

Fe,

Date

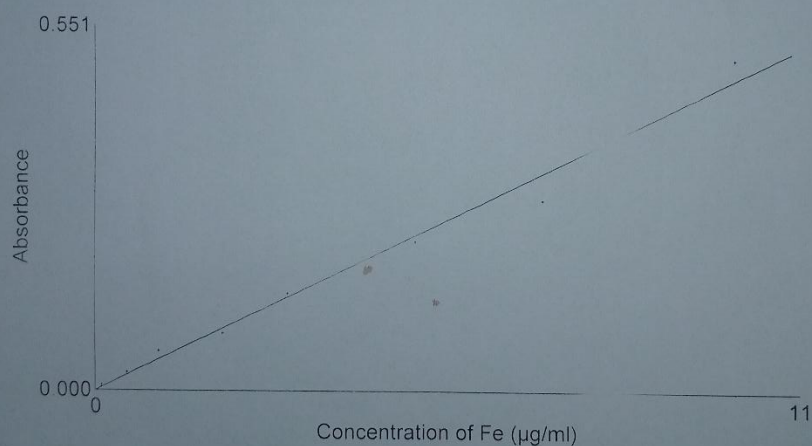
Tue May 20 02:14:32 2003

Full Calibration

Calibration Mode

Linear Least Squares Max Error : 0.8524 R^2 : 0.9849 R : 0.9924
 Conc = 0.0220 + 21.2058 * Abs

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates
Table Blank	-----	-----	0.0000	
Standard 1	0.100	-----	0.0072	
Standard 4	0.500	-----	0.0261	
Standard 5	1.000	-----	0.0590	
Standard 6	2.000	-----	0.0853	
Standard 7	3.000	-----	0.1469	
Standard 8	5.000	-----	0.2258	
Standard 7	7.000	-----	0.2889	
Standard 8	10.000	-----	0.5013	



Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates
Sample Blank	-----	HIGH	0.0002	
1A1	7.225	0.52	0.3397	0.3379 0.3414 0.3397
1A2	7.041	0.38	0.3310	0.3302 0.3324 0.3304
1B1	5.888	0.27	0.2766	0.2759 0.2766 0.2774
1B2	5.334	0.69	0.2505	0.2494 0.2492 0.2498
2A1	7.029	0.40	0.3304	0.3320 0.3298 0.3295
2A2	7.344	1.34	0.3453	0.3406 0.3429 0.3424
2B1	7.292	0.36	0.3428	0.3430 0.3440 0.3415
2B2	5.909	1.54	0.2776	0.2725 0.2744 0.2761
3A1	9.229	0.05	0.4342	0.4344 0.4340 0.4341
3A2	7.946	0.63	0.3736	0.3709 0.3738 0.3712

Sample Label	Conc. (µg/ml)	%RSD	Mean Abs.	Replicates		
3B1	9.501	0.82	0.4470	0.4411	0.4459	0.4440
3B2	9.238	0.49	0.4346	0.4348	0.4366	0.4324
4A1	7.879	0.69	0.3705	0.3729	0.3707	0.3678
4A2	8.087	0.87	0.3803	0.3841	0.3780	0.3789
4B1	6.444	13.63	0.3028	0.3093	0.2553	0.3239
4B2	6.906	0.67	0.3246	0.3222	0.3265	0.3251
5A1	3.323	1.34	0.1556	0.1579	0.1538	0.1552
5A2	6.266	0.51	0.2945	0.2952	0.2933	0.2939
5B1	5.384	1.68	0.2528	0.2578	0.2504	0.2503
5B2	5.460	2.30	0.2564	0.2601	0.2575	0.2617
6A1	6.750	0.53	0.3173	0.3186	0.3178	0.3154
6A2	6.739	0.90	0.3167	0.3180	0.3135	0.3187
6B1	8.333	0.69	0.3919	0.3889	0.3926	0.3942
6B2	7.574	0.80	0.3561	0.3550	0.3594	0.3540
7A1	7.301	0.68	0.3432	0.3433	0.3455	0.3409
7A2	7.986	1.04	0.3756	0.3782	0.3711	0.3774
7B1	7.537	0.59	0.3544	0.3543	0.3523	0.3565
7B2	6.793	6.77	0.3193	0.2944	0.3294	0.3340

RIWAYAT HIDUP



Penulis lahir pada tanggal 13 Maret 1997 di Breisach am Rhein, Jerman. Pendidikan dasar ditempuh di Lazarus-von-Schwendi Grundschule Ehrenkirchen dari tahun 2003 hingga 2007. Selanjutnya, penulis melanjutkan pendidikan menengah di Faust Gymnasium Staufen dari tahun 2007 hingga 2016. Pendidikan tinggi jenjang Sarjana ditempuh pada Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia, dari tahun 2021 hingga 2025.