

TA/TL/2022/1450

TUGAS AKHIR

**DISTRIBUSI SPASIAL LOGAM PADA AIR TANAH
DENGAN METODE PERBANDINGAN INTERPOLASI
DI DAERAH KONTAMINASI AIR ASAM KAWAH
IJEN SITUBONDO, JAWA TIMUR**

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



**AUNIATUL AULIA
18513014**

**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
YOGYAKARTA
2022**

TUGAS AKHIR

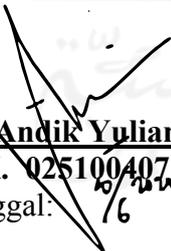
**DISTRIBUSI SPASIAL LOGAM PADA AIR TANAH
DENGAN METODE PERBANDINGAN INTERPOLASI
DI DAERAH KONTAMINASI AIR ASAM KAWAH
IJEN SITUBONDO, JAWA TIMUR**

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



**AUNIATUL AULIA
18513014**

Disetujui,
Dosen Pembimbing:


Dr. Andik Yulianto, S.T., M.T
NIK. 025100407
Tanggal: 16/6/2022


Nelly Marlina, S.T., M.T
NIK. 125130401
Tanggal:

Mengetahui,*
Ketua Prodi Teknik Lingkungan FTSP UII


Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.E.S., Ph.D.
NIK. 02510040
Tanggal:

HALAMAN PENGESAHAN

**DISTRIBUSI SPASIAL LOGAM PADA AIR TANAH
DENGAN METODE PERBANDINGAN INTERPOLASI
DI DAERAH KONTAMINASI AIR ASAM KAWAH
IJEN SITUBONDO, JAWA TIMUR**

Telah diterima dan disahkan oleh Tim Penguji

Hari: Kamis

Tanggal: 9 Juni 2022

AUNIATUL AULIA

18513014

Tim Penguji:

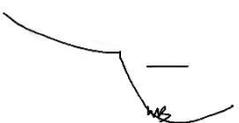
Dr. Andik Yulianto, S.T., M.T.

()

Nelly Marlina, S.T., M.T.

()

Dr-Ing. Widodo Brontowiyono, S.T., M.Sc

()

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 tanggung jawab saya, bukan tanggung jawab 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, 29 Maret 2022

Yang membuat pernyataan,



Auniatul Aulia

NIM: 18513014

PRAKATA

Puji dan syukur atas kehadiran Allah *subhanahu wa ta'ala* atas segala karunia-Nya sehingga peneliti telah diberi kemampuan untuk menyelesaikan penelitian laporan Tugas Akhir yang berjudul “Distribusi Spasial Logam pada Air Tanah dengan Metode Perbandingan Interpolasi di Daerah Kontaminasi Air Asam Kawah Ijen Situbondo, Jawa Timur”. Penyusunan laporan ini bertujuan untuk memenuhi syarat akademik untuk mendapatkan gelar Sarjana Teknik S1 Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Dalam penyusunan laporan ini penulis banyak mendapatkan semangat, dukungan, dorongan dan bimbingan serta bantuan dari berbagai pihak, sehingga pada kesempatan ini perkenankan peneliti menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT yang selalu memberikan kemudahan dalam menjalani dan menyelesaikan laporan tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua yang selalu memberikan doa, ridha, dan dukungannya dalam segala hal.
3. Kakak peneliti, Mas Atma. Semoga dipertemukan kembali di surga-Nya.
4. Ketua Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia Bapak Eko Siswoyo, S.T., M.Sc.ES., Ph.D.
5. Bapak Dhandhun Wacano, S.Si., M.Sc., Ph.D. (Cand.) yang selalu membantu, memberikan masukan dan dampingan selama berlangsungnya tugas akhir ini.
6. Bapak Dr. Andik Yulianto, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing 1 yang telah sabar membimbing dalam penyelesaian tugas akhir ini.
7. Ibu Nelly Marlina, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing 2 yang telah sabar membimbing dalam penyelesaian tugas akhir ini.

8. Bapak Dr-Ing Widodo Brontowiyono, S.T., M.Sc selaku dosen penguji yang telah sabar memberikan masukan dan saran dalam penyelesaian tugas akhir ini.
9. Ibu Elita Nurfitriyani, S.T., M.Sc selaku dosen pembimbing akademik yang telah banyak memberikan saran dalam segala masalah yang dialami selama menjadi mahasiswi Teknik Lingkungan UII.
10. Teman-teman. *I'm very grateful to be blessed with good friends around me. To those who stayed with me until now, thank you so much, may Allah bless you all.*

Peneliti menyadari bahwa dalam penyusunan laporan ini masih banyak terdapat berbagai kekurangan. Kritik dan saran diharapkan demi menyempurnakan laporan ini. Peneliti berharap semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi para pembacanya dan dapat ditindaklanjuti dengan pengimplementasian saran.

Yogyakarta, 29 Maret 2022

Auniatul Aulia



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

الجامعة الإسلامية
الاستدراكية

ABSTRAK

AUNIATUL AULIA. Distribusi Spasial Logam Pada Air Tanah dengan Metode Perbandingan Interpolasi di Daerah Kontaminasi Air Asam Kawah Ijen Situbondo, Jawa Timur. Dibimbing oleh Dr. ANDIK YULIANTO, S.T., M.T. dan NELLY MARLINA. S.T., M.,T.

Aktivitas vulkanik menyumbang logam serta berkontribusi dalam menurunkan kualitas air tanah di daerah kontaminasi aliran air asam Kawah Ijen dan sekitarnya. Pemilihan metode interpolasi yang tepat membantu dalam menghasilkan tingkat akurasi yang tinggi dan proses pengambilan keputusan yang berpengaruh terhadap informasi mitigasi risiko. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan tingkat akurasi beberapa teknik interpolasi, menganalisis kemungkinan sumber polutan logam dalam air tanah, menganalisis potensi kesehatan masyarakat terhadap paparan zona sebaran logam. Dalam penelitian ini 18 sampel dan 6 parameter (Fe, Zn, Mn, Pb, Cd, dan Cu) digunakan untuk menghasilkan peta interpolasi dan sebaran distribusi spasial serta menghasilkan analisis risiko kesehatan. Distribusi spasial elemen-elemen ini diidentifikasi menggunakan *Inverse Distance Weighting* (IDW) dan *Universal Kriging* (UK). Korelasi logam dengan jarak jaringan asam (Sungai Banyuputih dan saluran irigasi) yang diduga menjadi sumber utama logam dianalisis menggunakan analisis Pearson. Hasil uji validasi menunjukkan bahwa model IDW merupakan metode interpolasi terbaik untuk Cu, Cd, dan Pb. Sedangkan model UK merupakan metode interpolasi terbaik untuk Fe, Mn, dan Zn. Analisis korelasi logam dengan jaringan asam dan netral menunjukkan bahwa Pb berkorelasi dengan drainase asam dan sungai asam, sedangkan Mn, Cu, dan Cd tidak dipengaruhi oleh jaringan asam, sehingga mengindikasikan bahwa sumber logam tersebut tidak berasal dari jaringan asam. Selanjutnya Fe, Pb, dan Cd berpotensi tidak aman dan berisiko non karsinogenik pada semua area, yaitu zona bahaya sangat rendah hingga sangat tinggi dan Cd berpotensi tidak aman dan berisiko karsinogenik pada kategori zona sangat tinggi untuk dewasa.

Kata Kunci: Interpolasi, Logam, Risiko Kesehatan, Kontaminasi Air Tanah, Geostatistik, Kawah Ijen

ABSTRACT

AUNIATUL AULIA. *Spatial Distribution of Metals in Groundwater with Comparative Interpolation Methods in Acid Water Contamination Areas of Ijen Crater Situbondo, East Java. Supervised by Dr. ANDIK YULIANTO, S.T., M.T. dan NELLY MARLINA. S.T., M.,T.*

The volcano activity reduces groundwater quality in the contamination of Ijen Crater acid water flow and its surroundings. Choosing the suitable interpolation method helps produce accuracy and decision-making process that affect the mitigation and information. This study aims to compare the accuracy of several interpolation techniques, analyze possible sources of heavy metal pollutants in groundwater, and analyze the public health potential of metallic metal exposure zones. In this research, 18 samples with six elements (Fe, Zn, Mn, Pb, Cd, and Cu) have been used in producing the interpolation map, spatial distribution, and health risk assessment. These metals' spatial distribution was identified using Inverse Distance Weighting (IDW) and Universal Kriging (UK). The correlation of metals with the distance of the acid networks (Banyuputih river and irrigation system), suspected as the primary source of metals, was analyzed using Pearson Method. The cross-validation results that the IDW interpolation is the best interpolation for Cu, Cd, and Pb. While the UK interpolation is the best interpolation for Fe, Mn, dan Zn. Correlation analysis of metals with acidic and neutral networks showed that Pb correlated with acidic rivers, indicating that the source of these metals came from acidic networks, while Mn, Cu, and Cd were not affected by the acid network, thus indicating that the source of the metals did not originate from the acid network. Furthermore, Fe, Pb, dan Cd are potentially unsafe and have non-carcinogenic risks in all areas, with very low to very high categories and Cd is potentially unsafe and have carcinogenic risk in very high category for adult.

Keywords: *Interpolation, Metals, Health Risks, Groundwater Contamination, Geostatistical, Ijen Volcano Crater.*



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

PRAKATA	v
ABSTRAK	viii
ABSTRACT	ix
DAFTAR ISI	xi
BAB I PENDAHULUAN	18
1.1 Latar Belakang	18
1.2 Rumusan Masalah	19
1.3 Tujuan Penelitian	20
1.4 Ruang Lingkup	20
1.5 Manfaat Penelitian	21
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	23
2.1 Dampak Air Asam Kawah Ijen di Lingkungan	23
2.2 Dampak Logam	24
2.3 Mekanisme Pencemaran Air Tanah	25
2.4 Hubungan Air Permukaan dengan Air Tanah	25
2.5 Teknik Interpolasi	26
2.6 Teknik Korelasi Jarak	27
2.7 Penelitian Terdahulu	28
BAB III METODE PENELITIAN	32
3.1 Diagram Alir Penelitian	32
3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian	33
3.3 Metode Penelitian	33
3.3.1 Metode Pengumpulan Data	33
3.3.2 Teknis Analisis Data	34
3.3.3 Analisis Spasial	39
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	42
4.1. Analisis Karakteristik Sebaran Data	42
4.1.1. Teknik Histogram (<i>Basic Statistic</i>)	42
4.1.2. Teknik QQ Plot (Plot Linearitas)	46

4.2. Analisis Perbandingan Teknik Interpolasi.....	48
4.2.1. Analisis Hasil Peta Interpolasi dengan Metode IDW dan UK.....	48
4.2.2. Analisis Perbandingan Hasil Uji Validasi-statistik.....	51
4.3. Analisis Korelasi Sumber Pencemar	56
4.3.1. Analisis Perhitungan Jarak Jaringan	56
4.3.2. Analisis Hasil Korelasi	60
4.4. Potensi Paparan Logam Berdasarkan Peta Zona Bahaya.....	62
4.4.1. Analisis Peta Zona Bahaya Logam.....	62
4.4.2. Analisis Luas Area Zona Bahaya dan Paparan Terhadap Jumlah Penduduk	70
4.5. Potensi Risiko Paparan dan Efek Kronik Pada Konsentrasi Distribusi Spasial	79
4.5.1. Risiko Non-karsinogenik	80
4.5.2. Risiko Karsinogenik	83
4.5.3. Efek Paparan	84
4.5.4. Strategi Pengelolaan Risiko Non Karsinogenik.....	85
4.5.4. Strategi Pengelolaan Risiko Karsinogenik	87
4.5.5. Cara Pengelolaan Risiko dengan Pendekatan Teknologi	88
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	91
5.1. Kesimpulan.....	91
5.2. Saran	92
DAFTAR PUSTAKA	94



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Perbandingan antara IDW dan Kriging.....	27
Tabel 2 Penelitian Terdahulu	29
Tabel 3 Kriteria Penafsiran Korelasi Pearson	39
Tabel 4 Rangkuman Analisis yang Dilakukan.....	40
Tabel 5 Ringkasan Hasil Statistik Histogram pada Semua Parameter.....	45
Tabel 6 Hasil Perhitungan Error dari Interpolasi IDW pada Setiap Parameter	52
Tabel 7 Hasil Perhitungan Error dari Interpolasi Universal Kriging pada Setiap Parameter.....	52
Tabel 8 Hasil Cross-tab Logam dengan Jaringan Drainase Netral	57
Tabel 9 Hasil Cross-tab Logam dengan Sungai Netral.....	58
Tabel 10 Hasil Cross-tab Logam dengan Jaringan Drainase Asam.....	59
Tabel 11 Hasil Cross-tab Logam dengan Jaringan Sungai Asam.....	59
Tabel 12 Hasil Analisis Korelasi Konsentrasi Logam Dengan Jaringan Netral dan Asam	61
Tabel 13 Area Zona Bahaya dan Potensi Jumlah Penduduk Terpapar Fe	70
Tabel 14 Area Zona Bahaya dan Potensi Jumlah Penduduk Terpapar Zn.....	72
Tabel 15 Area Zona Bahaya dan Potensi Jumlah Penduduk Terpapar Mn.....	73
Tabel 16 Area Zona Bahaya dan Potensi Jumlah Penduduk Terpapar Pb.....	75
Tabel 17 Area Zona Bahaya dan Potensi Jumlah Penduduk Terpapar Cd	76
Tabel 18 Area Zona Bahaya dan Potensi Jumlah Penduduk Terpapar Cu	78
Tabel 19 Rata-rata Konsentrasi Logam Tiap Zona	79
Tabel 20 Parameter Model Penilaian Risiko Kesehatan Air Tanah.....	80
Tabel 21 Nilai Rfd Setiap Parameter	80
Tabel 22 Hasil Analisis Intake Oral Efek Non Karsinogenik	81
Tabel 23 Hasil Nilai Karakterisasi Risiko (RQ) dan Hazard Index (HI) Efek Non Karsinogenik	81
Tabel 24 Nilai SF pada Setiap Parameter	83
Tabel 25 Hasil Intake Oral (I) dan Ekses Risiko Karsinogenik (ECR) Pb dan Cd.....	84
Tabel 26 Strategi Pengelolaan Risiko Non Karsinogenik Melalui Oral	87
Tabel 27 Strategi Pengelolaan Risiko Karsinogenik Melalui Oral	88



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

الجامعة الإسلامية
الاستدراكية

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Peta Kawasan Kawah Ijen.....	23
Gambar 2 Diagram Penelitian.....	32
Gambar 3 Peta Lokasi Penelitian.....	33
Gambar 4 Sebaran Titik Sampel (Data Awal).....	34
Gambar 5 Histogram Tanpa Transformasi dan setelah Transformasi Log.....	43
Gambar 6 Normal QQ Plot tanpa Transformasi dan setelah Transformasi Log...	47
Gambar 7 Hasil Peta Interpolasi IDW dan UK pada Parameter Fe, Zn, dan Mn .	49
Gambar 8 Hasil Peta Interpolasi IDW dan UK pada Parameter Pb, Cd, dan Cu..	50
Gambar 9 Semivariogram Metode Interpolasi IDW dan UK setiap Parameter....	53
Gambar 10 Perbandingan Cross Validation dari Setiap Metode Interpolasi dari parameter Fe, Zn, dan Mn.....	54
Gambar 11 Perbandingan Cross Validation dari Setiap Metode Interpolasi dari parameter Pb, Cd, dan Cu.....	55
Gambar 12 Peta Kalkulasi Jarak Jaringan (a) Irigasi Netral (b) Sungai Netral (c) Drainase Asam (d) Sungai Asam.....	57
Gambar 13 Peta Zona Bahaya Logam Fe.....	62
Gambar 14 Peta Zona Bahaya Logam Zn.....	64
Gambar 15 Peta Zona Bahaya Logam Mn.....	65
Gambar 16 Peta Zona Bahaya Logam Pb.....	66
Gambar 17 Peta Zona Bahaya Logam Cd.....	67
Gambar 18 Peta Zona Bahaya Logam Cu.....	69
Gambar 19 Persentase Area Zona Bahaya Fe.....	70
Gambar 20 Persentase Area Zona Bahaya Zn.....	71
Gambar 21 Persentase Area Zona Bahaya Mn.....	73
Gambar 22 Persentase Area Zona Bahaya Pb.....	74
Gambar 23 Persentase Area Zona Bahaya Cd.....	76
Gambar 24 Persentase Area Zona Bahaya Cu.....	77



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

الجامعة الإسلامية
الاستدراكية
الاندونيسية

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kawah Ijen adalah kawah air asam terbesar di dunia yang terletak di Kabupaten Situbondo-Banyuwangi, Provinsi Jawa Timur (Caudron *et al.*, 2015). Kawah ini mengandung air asam dengan pH <0,3 (Löhr *et al.*, 2005). Danau Kawah Ijen dilaporkan sebagai sumber polutan yang masuk ke dalam sistem aliran Sungai Banyupahit-Banyuputih, akibat rembesan air kawah di bawah dam yang dibangun pada tahun 1921 oleh Belanda (Delmelle *et al.*, 2000). Area yang tercemar air asam adalah Kecamatan Asembagus, Banyuputih, serta Jangkar yang merupakan daerah aliran Sungai Banyuputih-Banyupahit (Heikens *et al.*, 2005). Rembesan air kawah mengakibatkan penurunan kualitas air (Delmelle *et al.*, 2000), kualitas tanah pertanian dan produktivitas pertanian (van Rotterdam-Los *et al.*, 2008), hingga berdampak pada kesehatan manusia (Löhr *et al.*, 2005).

Air Sungai Banyuputih mengandung pH sekitar 3,3 (Löhr *et al.*, 2005), serta elemen berbahaya dengan konsentrasi yang tinggi yang turut masuk ke dalam sungai irigasi, diantaranya SO₄ 150 ton/hari; fluoride 2,8 ton/hari, SiO₂ 34 ton/hari, Mn 0,42 ton/hari; Ti 0,35 ton/hari, dan Cu 0,004 ton/hari (Delmelle *et al.*, 2000). Air tersebut berpotensi mengalami infiltrasi, dan digunakan oleh mayoritas masyarakat di Kecamatan Asembagus sebagai sumber air minum dan kebutuhan sehari-hari (Budipramana *et al.*, 2002). Selain itu, data BPS Situbondo dari tahun 2011-2018 juga menunjukkan bahwa pada saat ini, masyarakat masih tetap menggunakan air tanah. Akibatnya, banyak yang mengalami gangguan kesehatan, seperti gigi menguning dan keropos (*dental fluorosis*), permasalahan pencernaan (*diarrhea*), serta permasalahan kulit (*dermatitis*) (Aminuddin *et al.*, 2015).

Wilayah aliran Sungai Banyuputih, tepatnya di Kecamatan Asembagus dan Banyuputih sudah sangat lama mengalami pencemaran karena polutan yang berasal dari Kawah Ijen. Oleh karena itu, penelitian ini bermaksud untuk melanjutkan penelitian-penelitian sebelumnya dalam hal teknik analisis spasial dan menguji

hubungan antara sumber polutan dan kualitas air tanah terutama pada elemen berbahaya logam Fe, Cd, Cu, Zn, Pb, dan Mn. Logam tersebut dipilih karena memiliki konsentrasi yang melebihi baku mutu. Terutama pada air sungai dengan konsentrasi Fe sebesar 24,4 mg/l; Cu 0,03 mg/l; Zn 0,084 mg/l; Mn 1,325 mg/l; dan Pb 0,24 mg/l (Heikens *et al.*, 2005b). Sedangkan Cd dan Mn ditemukan pada hasil panen masyarakat Asembagus (Rajni and Keshav, 2010). Selain itu, elemen-elemen tersebut termasuk dalam logam yang telah mengalami peningkatan konsentrasi baik di air sungai maupun tanah permukaan (Heikens *et al.*, 2005b). Sehingga, seberapa besar konsentrasi dalam air tanah perlu ditinjau lebih lanjut untuk membuktikan hubungan transportasi polutan di lokasi penelitian.

Keterbatasan waktu dan biaya di tengah kondisi pandemi menghambat pengambilan sampel (Chung *et al.*, 2019). Ketidakterdediaan sampel data dapat diprediksi menggunakan metode interpolasi. Namun, penggunaan interpolasi yang berbeda dapat menyebabkan estimasi nilai konsentrasi logam yang berbeda pada titik interpolasi. Karena alasan ini, penggunaan perbandingan interpolasi merupakan kunci untuk memperoleh tingkat akurasi yang tinggi (Bronowicka-Mielniczuk *et al.*, 2019). Sebab, akurasi tinggi sangat berpengaruh terhadap informasi mitigasi bahaya polusi yang disebabkan oleh pencemaran air tanah. Selain itu, analisis sumber polutan juga sangat penting sebagai langkah awal dalam analisis risiko dan dampak lingkungan, terutama kualitas air tanah yang menjadi sumber utama air minum masyarakat di wilayah penelitian.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang terkait, belum ditemukan secara pasti kemungkinan sumber pencemar pada air tanah di Kecamatan Asembagus dan sekitarnya. Sehingga, perlu dilakukan analisis sebaran konsentrasi logam serta kaitannya dengan air sungai yang sudah lama mengalami pencemaran dari Kawah Ijen. Disamping itu, pendekatan yang selama ini dilakukan adalah dengan menggunakan metode sampling, namun, karena adanya keterbatasan kegiatan lapangan akibat pandemi, maka diperlukan metode interpolasi untuk menganalisis konsentrasi logam di daerah yang tidak tersampel. Guna memperoleh tingkat akurasi yang

tinggi pada model interpolasi, digunakan perbandingan beberapa metode interpolasi, karena keakuratan akan berpengaruh terhadap langkah awal dalam mitigasi risiko.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian adalah sebagai berikut:

1. Membandingkan tingkat akurasi beberapa teknik interpolasi spasial konsentrasi logam dalam air tanah di sekitar aliran air asam Kawah Ijen.
2. Menganalisis kemungkinan sumber polutan logam dalam air tanah di sekitar aliran air asam Kawah Ijen.
3. Menganalisis potensi kesehatan masyarakat terhadap paparan zona sebaran logam.

1.4 Ruang Lingkup

Penelitian ini merupakan penelitian literatur untuk mendapatkan hasil analisis kualitas air tanah. Adapun batasan-batasannya, sebagai berikut:

1. Penelitian berlokasi di hilir Sungai Banyuputih, yang secara administratif terletak di Kecamatan Asembagus dan Kecamatan Banyuputih.
2. Parameter logam yang dianalisis sebarannya adalah Fe, Cd, Cu, Zn, Pb, dan Mn.
3. Interpolasi menggunakan metode IDW dan UK yang dioptimalkan dan kemudian tidak menganalisis lebih jauh terkait penurunan persamaan yang digunakan pada kedua model interpolasi.
4. Nilai power pada model IDW menggunakan nilai yang optimal.
5. Analisis data awal yang dikaji merupakan karakteristik sebaran data.
6. Analisis potensi kesehatan masyarakat untuk mengetahui status bahaya terhadap paparan zona sebaran logam.
7. Analisis risiko lingkungan kesehatan yang dilakukan hanya analisis untuk mengetahui paparan melalui oral (air minum).
8. Analisis hubungan jarak Sungai Banyuputih dengan konsentrasi logam dalam air tanah untuk menentukan kemungkinan sumber pencemar air tanah.

9. Cara pengelolaan risiko dilakukan dengan pengelolaan risiko sederhana.
10. Data yang digunakan merupakan data sekunder dari penelitian tahun 2019.
11. Pemetaan dilakukan menggunakan metode interpolasi dengan *software* ArcGIS 10.8 dan ILWIS 3.31 *Academic*.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Harapannya dapat memberikan informasi terkait kualitas air tanah pada daerah kontaminasi, sehingga pada kedepannya masyarakat lebih menyadari dan waspada mengenai penggunaan air tanah yang tercemar.
2. Diharapkan dapat memberikan informasi mitigasi bencana kepada pemerintah Situbondo serta masyarakat setempat.



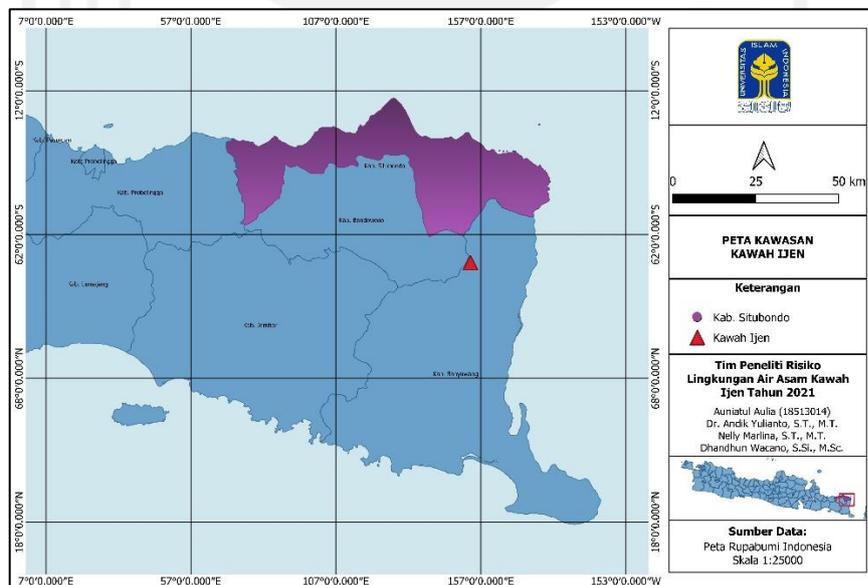
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Dampak Air Asam Kawah Ijen di Lingkungan

Kawah Ijen yang terletak di Kabupaten Situbondo-Banyuwangi, Jawa Timur (**Gambar 1**) mengandung air yang bersifat asam dan jutaan ton logam terlarut (Zelenov 1969). Air asam telah mengalir ke Sungai Banyupahit-Banyuputih selama ± 200 tahun (Zelenov 1969). Sungai ini digunakan untuk mengairi pertanian oleh masyarakat Asembagus dan sekitarnya (Delmelle *et al.*, 2000). Akibatnya, air yang mengandung elemen berbahaya telah terakumulasi dan menyebabkan minimnya flora dan fauna (Delmelle *et al.*, 2000). Delmelle juga melaporkan, bahwa menurut pengamatan penduduk sekitar, air asam yang dialirkan ke laut dari sistem irigasi menyebabkan kematian ikan.



Gambar 1 Peta Kawasan Kawah Ijen

Menurunnya hasil panen hingga 70% dalam beberapa tahun terakhir dialami oleh masyarakat di daerah irigasi (Löhr *et al.*, 2005). Selanjutnya, Löhr mengungkapkan bahwa tidak ditemukan invertebrata di area ini. Hal ini

dikarenakan invertebrata tidak dapat hidup pada area dengan pH yang terlalu rendah (<4) (Berezina, 2001). Sebab, pH merupakan salah satu faktor yang berkaitan erat dengan logam. Suatu area dengan pH yang rendah akan menyebabkan semakin tingginya konsentrasi logam dan meningkatkan toksisitas pada logam, dan sebaliknya pada area dengan kondisi pH yang tinggi, akan menyebabkan semakin rendahnya konsentrasi logam (Singh and Kumar, 2017).

2.2 Dampak Logam

Konsentrasi logam yang tinggi menyebabkan penurunan kualitas air tanah (Azizullah *et al.*, 2011). Mengonsumsi air tanah yang terkontaminasi logam meningkatkan angka kesakitan dan kematian di seluruh dunia (Khalid *et al.*, 2020). Hal ini karena logam tidak dapat terurai, dan dapat terakumulasi dalam tubuh (Herojeet *et al.*, 2015). Dampaknya dapat menyebabkan efek kronis dan subkronis yang mengakibatkan penurunan kekebalan, stress oksidatif, hingga menyebabkan kanker (Kim *et al.*, 2019). Hal ini dikarenakan logam bersifat karsinogenik dan mutagenik (Rehman *et al.*, 2018).

Dampak logam terjadi pada masyarakat Asembagus akibat kelebihan asupan dari mengonsumsi beras yang terdapat peningkatan logam, serta mengonsumsi air minum yang bersumber dari air tanah (Heikens *et al.*, 2005a). Unsur yang mengalami peningkatan adalah B, Mn, dan V, di sisi lain, terjadi kekurangan asupan Fe, Zn, dan Ca (Heikens *et al.*, 2005b). Berdasarkan komunikasi S. Sumarti & M. Van Bergen, tingginya beberapa logam tersebut karena adanya bukti bahwa air tanah berhubungan dengan Sungai Banyuputih. Nilai HQ (*Hazard Quotient*) pada hasil produksi tersebut tidak menunjukkan adanya risiko serius bagi kesehatan manusia (Heikens *et al.*, 2005b). Namun, dengan mempertimbangkan ketidakpastian, Heikens menyatakan bahwa, asupan unsur yang tidak seimbang dan kekurangan Fe dapat menjadi masalah yang paling serius bagi kesehatan.

2.3 Mekanisme Pencemaran Air Tanah

Pencemaran air tanah merupakan masuknya zat yang tidak diinginkan ke dalam tanah. Pembuangan limbah domestik, kota, dan aktivitas pertanian menyumbangkan logam di air tanah (Li *et al.*, 2021). Jenis-jenis kontaminan air tanah dapat dibedakan menjadi tiga, yaitu: kontaminan kimia, biologis, dan radioaktif (Li *et al.*, 2021). Kontaminan-kontaminan tersebut dapat berasal dari sumber geogenik dan antropogenik (Singh and Kumar, 2017). Sumber geogenik salah satunya berasal dari pelapukan mineral, sedangkan sumber antropogenik dapat berasal dari aktivitas pertanian (Elumalai *et al.*, 2020). Sumber antropogenik dapat menjadi permasalahan yang serius. Begitu juga dengan sumber geogenik, apabila aktivitas manusia mengganggu keseimbangan, seperti penipisan akuifer, hingga penggunaan air tercemar sebagai irigasi dan air minum (Su *et al.*, 2020).

Air tanah dapat mengandung logam apabila kontaminan masuk ke dalam tanah dikarenakan sifatnya yang memiliki mobilitas tinggi, sehingga dapat bergerak dan larut ke dalam akuifer (Lou *et al.*, 2017). Logam masuk ke dalam akuifer melalui proses infiltrasi karena peristiwa hidrologi (Thuyet *et al.*, 2016). Mobilitasnya dalam air tanah menunjukkan variasi yang lebih tinggi (Chandrasekar *et al.*, 2021). Salah satu faktor yang mempengaruhi mobilitas logam adalah aktivitas manusia (Parisi *et al.*, 2011). Selain aktivitas manusia, terdapat juga faktor lain, yaitu faktor pH. pH yang rendah akan menurunkan penyerapan logam dalam air tanah, dengan demikian akan meningkatkan mobilitas logam, sehingga memperparah pencemaran pada air tanah (Chandrasekar *et al.*, 2021).

2.4 Hubungan Air Permukaan dengan Air Tanah

Air tanah merupakan sumber daya alam yang menyumbang sekitar 30% dari total air tawar. Luas dan jumlah air tanah sangat bergantung pada iklim, penggunaan lahan, tutupan lahan, tanah, konektivitas ke badan air permukaan, serta geologi yang mendasari (Safeeq and Fares, 2016). Air yang tersimpan dalam air tanah terus bergerak dan bertukar secara alami dengan badan air (misalnya sungai, dan danau ataupun saluran buatan, yaitu irigasi) (Safeeq and Fares, 2016). Air tanah dan air permukaan berinteraksi hampir di semua lanskap, mulai dari sungai kecil, hingga

danau (Winter, 1999). Interaksi air tanah dan air permukaan terjadi oleh aliran lateral permukaan melalui zona tak jenuh dan dengan infiltrasi atau eksfiltrasi dari zona jenuh (Sophocleous, 2002).

Interaksi air permukaan dengan air tanah ditunjukkan karena adanya faktor limpasan sungai dan tingkat air tanah (Meng *et al.*, 2021). Meng *et al.* (2021) juga menginformasikan bahwa perubahan jumlah limpasan sungai dari waktu ke waktu ditemukan serupa dengan perubahan jumlah interaksi air permukaan dan air tanah. Perlu dicatat bahwa ketinggian air dan limpasan sungai akan memiliki dampak tertentu terhadap air tanah (Meng *et al.*, 2021). Faktor lain adanya interaksi antara keduanya adalah tinggi atau tingkat air tanah. Karena tingkat air tanah mempengaruhi perbedaan antara muka air tanah dan muka permukaan (Meng *et al.*, 2021). Perbedaan ketinggian ini menentukan interaksi air permukaan dan air tanah.

2.5 Teknik Interpolasi

IDW (*Inverse Distance Weighting*) adalah interpolator deterministik dengan mempertimbangkan titik disekitarnya (Bronowicka-Mielniczuk *et al.*, 2019). IDW mengasumsikan setiap nilai titik memiliki bobot yang berkurang jika jarak titik yang terukur semakin jauh (Singh and Verma, 2019). Metode ini sangat baik dalam mengestimasi nilai menggunakan data dengan jarak yang paling dekat (Ahmad *et al.*, 2021). Karena, dapat dioptimalkan dengan memilih RMS (*Root Mean Square*) terendah dengan mengubah nilai *power* (Ahmad *et al.*, 2021). Oleh karena itu, IDW tidak dapat memperkirakan nilai di atas nilai maksimum dan di bawah nilai minimum (Bashir *et al.*, 2015). Adapun kelebihanannya bekerja paling baik dengan titik yang terdistribusi secara merata (Gentile *et al.*, 2013).

Universal kriging (UK) merupakan interpolasi tak bias, dan termasuk dalam interpolator stokastik (Bronowicka-Mielniczuk *et al.*, 2019). Stokastik adalah estimasi dengan menggabungkan konsep keacakan dan menghasilkan nilai perkiraan (Gentile *et al.*, 2013). Kelebihanannya dapat mengestimasi nilai yang tidak disampel dan memodelkan ketidakpastian atau kesalahan dari area yang diestimasi (Bronowicka-Mielniczuk *et al.*, 2019). Interpolasi ini dikenal sebagai kriging

dengan tren (Gundogdu *et al.*, 2007), sebab digunakan pada data non-stasioner atau data yang memiliki tren yang kuat dan terdistribusi secara sederhana (Kiš, 2016). Data non-stasioner merupakan data yang memiliki rata-rata dan varian yang tidak konstan dari waktu ke waktu (Park and Kim, 2021). **Tabel 1** menunjukkan perbandingan antara IDW serta UK

Tabel 1 Perbandingan antara IDW dan Kriging

	IDW	Kriging
Kelas interpolasi	Interpolasi lokal	Interpolasi geostatistik
Tipe Keluaran	Prediksi	Prediksi, probabilitas, dan prediksi error
Hasil permukaan peta	Tidak halus	Sedang
Kelebihan	Simple dan fleksibel	Memanfaatkan sepenuhnya autokorelasi spasial
Kekurangan	Munculnya pola “ <i>bulls-eye</i> ” dengan titik sampel sekitar yang memiliki nilai yang sangat berbeda dari lngkungannya	Pengaturan parameter lebih kompleks, jumlah sampel banyak sangat diperlukan, <i>smoothing effect</i>

Sumber: Li and Heap, 2011

2.6 Teknik Korelasi Jarak

Tingkat pencemaran air tanah salah satunya disebabkan oleh jarak air tanah dari sumber pencemar (Tiwari *et al.*, 2013). Sehingga, jarak sumber pencemar mempengaruhi tinggi rendahnya konsentrasi logam di air tanah (Sasongko *et al.*, 2014). Seperti halnya pada penelitian Tiwari *et al.* (2013), konsentrasi logam lebih tinggi pada sampel air yang terletak di dekat sumber pencemar, dan lebih rendah pada area yang memiliki jarak lebih jauh dari sumber pencemar. Sama halnya pada penelitian Heikens *et al.* (2005a), yang melaporkan bahwa sampel sumur yang mengandung fluoride dengan konsentrasi paling tinggi berada di dekat sungai Banyuputih yang merupakan aliran air asam Kawah Ijen.

ILWIS (*The Integrated Land and Water Information System*) merupakan Sistem Informasi Geografis (SIG) yang dapat mengolah data set berupa raster ataupun

vektor (52 North, 2021). SIG ini dapat digunakan dalam analisis korelasi spasial (Nijmeijer *et al.*, 2001). Rumus kalkulasi jarak dalam ILWIS disajikan pada persamaan 1.

$$\text{OutMap} = \text{MapDistance}(\text{source rasmap}, \text{weight map}) \dots \dots \dots (1)$$

Dimana *OutMap* merupakan *expression*, nama objek luaran. Simbol (=) menunjukkan akan membuat objek luaran dependen atau objek sumber. Kemudian *MapDistance* adalah *expression* yang diikuti oleh tanda kurung dan dipisahkan dengan koma.

Keterkaitan antara dua variabel dapat diukur menggunakan koefisien korelasi. Salah satunya adalah dengan koefisien korelasi Pearson (PCCA). Pearson (1901) menyatakan bahwa, korelasi ini diperoleh dengan cara membagi kovarian dari dua variabel dengan standar deviasinya. Koefisien korelasi Pearson merupakan indeks untuk menghitung aerografi, biologi, serta polusi (Lou *et al.*, 2017). Korelasi ini dapat digunakan untuk mengukur hubungan antara variabel jarak dan kemungkinan sumber pencemar logam (Omwene *et al.*, 2018). Adapun rumus korelasi Pearson disajikan pada persamaan 2 sebagai berikut:

$$r_{xy} = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i \cdot y_i - (\sum_{i=1}^n x_i) \cdot (\sum_{i=1}^n y_i)}{\sqrt{n \cdot \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2} \cdot \sqrt{n \cdot \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2}} \dots \dots \dots (2)$$

r_{xy} adalah keterikatan variabel x dan y, dan n adalah jumlah data. Nilai r_{xy} antara -1 sampai 1. Nilai $r_{xy} = -1$ menunjukkan bahwa korelasi negatif sempurna, begitupun sebaliknya dengan nilai +1 (Profillidis and Botzoris, 2019).

2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian logam pada air tanah sudah cukup banyak diteliti. Penelitian-penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini ditunjukkan pada **Tabel 2**.

Tabel 2 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Metode	Hasil Penelitian
1.	Löhr <i>et al.</i> , 2005	Sampling dilakukan 3 kali pada setiap parameternya. pH, dan konduktivitas menggunakan metode <i>Multi-line P4 aquatic field kit</i> ; sampel air dikumpulkan pada botol polipropilena; nitrat dianalisis menggunakan metode reduksi kadmium. Sulfat menggunakan metode Ver 4; klorida menggunakan merkuri tiosianat; dan fosfor menggunakan metode molibdovanadat.	Danau Kawah Ijen memiliki pH <0,3. Aliran air asam digunakan sebagai irigasi. Akibatnya tanah pertanian daerah irigasi memiliki pH 3,9 Hasilnya, sampel tanaman mengandung elemen berbahaya yang sangat tinggi, berbahaya yang sangat tinggi, sehingga penurunan produktivitas dikaitkan oleh kandungan air irigasi yang tercemar.
2.	Heikens <i>et al.</i> , 2005a	Untuk menetapkan asupan harian, dilakukan studi diet total. Semua potensi sumber paparan diidentifikasi dan memperkirakan tingkat konsumsi. Asupan makanan dihitung dan dibandingkan dengan TDI dan RNI	Rata-rata unsur tidak seimbang dan defisiensi Fe merupakan masalah kesehatan yang paling serius. Efek toksik tidak dapat sepenuhnya dikesampingkan, karena kekurangan unsur esensial seperti Ca, Fe, dan Zn dapat meningkatkan penyerapan berbagai unsur. Selain itu terdapat beberapa peningkatan unsur logam Fe, Cd, Cu, Zn, Pb, dan Mn di sungai maupun tanah permukaan.
3.	Ahmad <i>et al.</i> , 2021	Menggunakan metode perbandingan Interpolasi yaitu SK, IDW dan RBFs	SK lebih baik dari IDW dalam mengestimasi pH, klorida, selenium, strontium, SAR, lithium, nitrat. IDW lebih baik dalam mengestimasi TDS, boron, sulfat. Sedangkan RBF lebih baik dalam mengestimasi selenium dan

(lanjutan)

		boron. IDW dan RBF menghasilkan peta interpolasi yang lebih baik dalam memvisualkan lokasi air.
--	--	---

Penelitian terdahulu yang telah dilakukan pada **Tabel 2** menunjukkan beberapa hasil penelitian dari Kawah Ijen yang mengandung elemen berbahaya seperti logam dengan konsentrasi yang tinggi dan pH yang sangat rendah, serta terdapat penelitian mengenai kualitas air tanah dengan menggunakan beberapa metode interpolasi untuk menentukan metode interpolasi yang paling akurat. Sementara itu, belum terdapat penelitian mengenai keterkaitan antara Sungai Banyuputih dengan air tanah tercemar di aliran air asam Kawah Ijen, dan sebaran logam pada air tanah di sekitar aliran air asam Kawah Ijen dengan menggunakan metode interpolasi. Sehingga, pada hal ini peneliti memilih topik yang berkaitan dengan sebaran logam pada air tanah dengan menggunakan beberapa metode interpolasi dan korelasi antara konsentrasi logam pada air tanah dengan Sungai Banyuputih sebagai bahan penelitian.



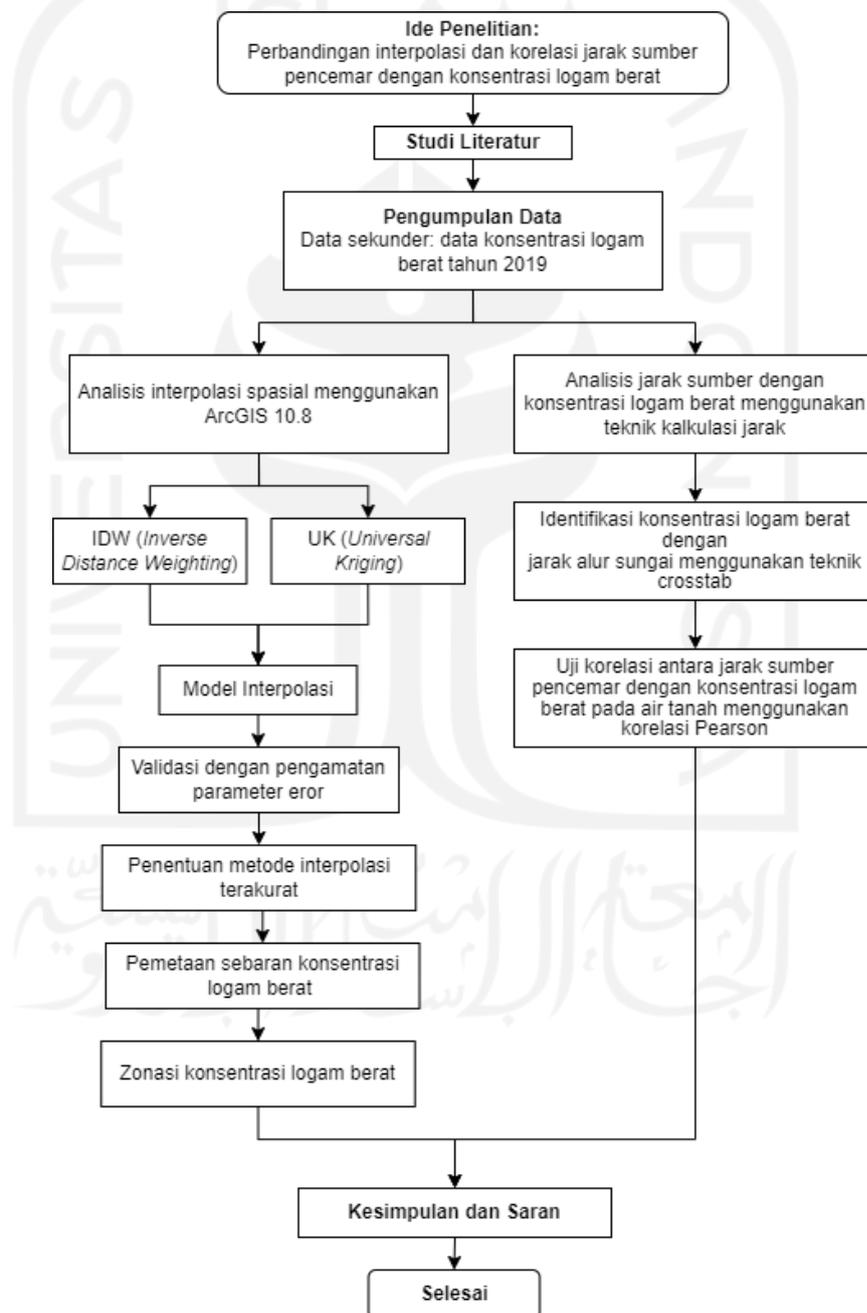
“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

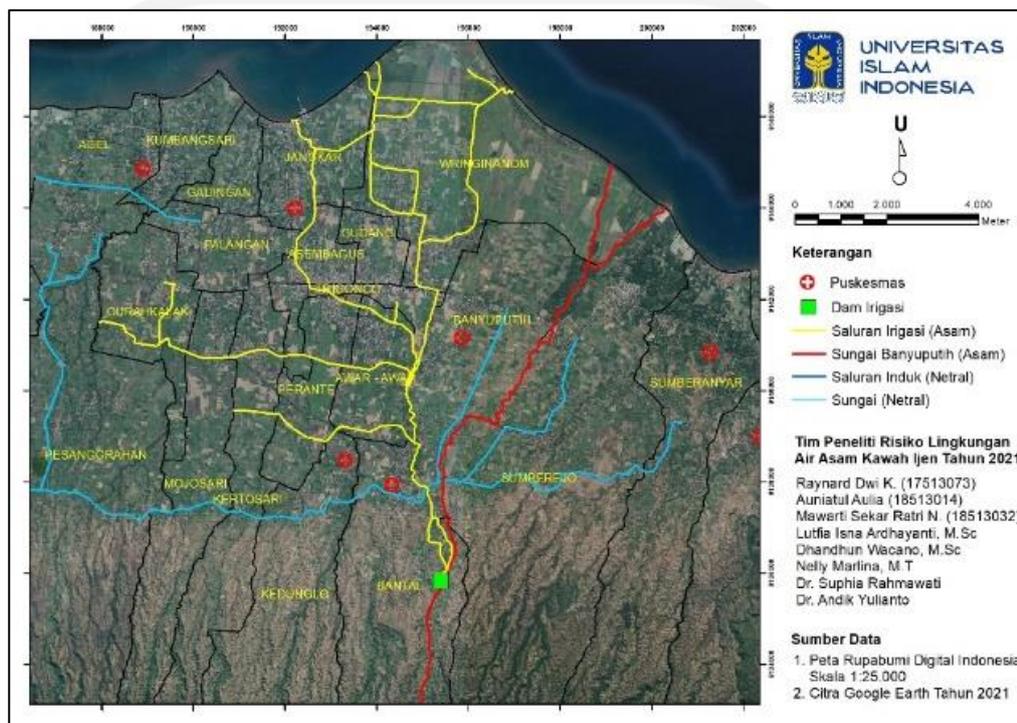
Diagram alir penelitian yang ditunjukkan pada **Gambar 2** sebagai berikut:



Gambar 2 Diagram Penelitian

3.2 Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi penelitian berada di Kecamatan Asembagus, dan Banyuputih, Kabupaten Situbondo, Jawa Timur seperti yang tertera pada **Gambar 3**. Penelitian telah dimulai pada Bulan Maret 2021 dengan mengumpulkan data sekunder, hingga bulan Mei 2021.



Gambar 3 Peta Lokasi Penelitian

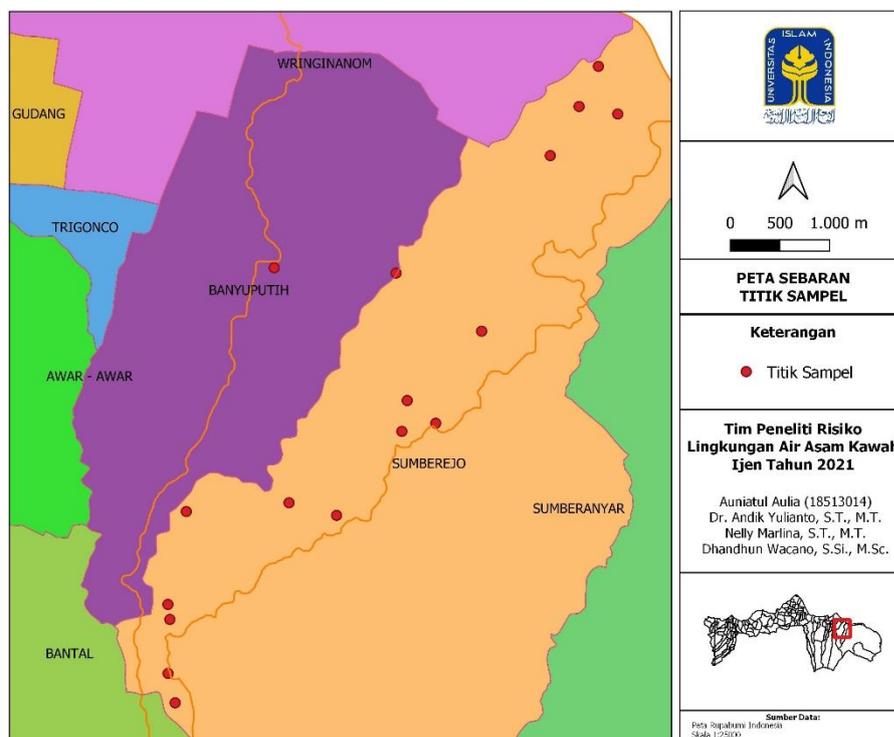
3.3 Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian awal dalam rangkaian penelitian Kawah Ijen bersamaan dengan permasalahan fluoride dan pengaruhnya terhadap produktivitas pertanian yang dipengaruhi oleh kontaminasi air asam Kawah Ijen sehingga terdapat pengembangan teknik analisis risiko lingkungan dengan sumber pencemaran vulkanogenik di bagian utara Gunung Kawah Ijen.

3.3.1 Metode Pengumpulan Data

Penelitian literatur ini menggunakan data sekunder dari instansi Pemerintah Situbondo, dan penelitian terdahulu, yaitu dari penelitian Pristiyanto (2019). Adapun data awal logam yang akan diinterpolasi terdapat 18 titik sebaran sampel

yang diambil dari beberapa sumur dangkal maupun dalam masyarakat Asembagus dan air Sungai Banyuputih. Sebaran titik sampel yang akan digunakan pada penelitian ini disajikan dalam **Gambar 4** berikut:



Gambar 4 Sebaran Titik Sampel (Data Awal)

Sumber: Pristiyanto, 2019

Data-data yang digunakan dalam penelitian ini diantaranya:

1. Peta administrasi Kabupaten Situbondo untuk mengetahui batasan lokasi kajian
2. Data konsentrasi logam (Fe, Cd, Cu, Zn, Pb, dan Mn) pada air tanah tahun 2019 yang digunakan sebagai nilai masukan interpolasi.
3. Data jumlah penduduk lokasi penelitian tahun 2020 untuk mengetahui jumlah penduduk berpotensi terpapar logam.

3.3.2 Teknis Analisis Data

Teknik analisis menggunakan analisis spasial dengan *software* ArcGIS 10.8 dan ILWIS 3.31 *Academic*.

A. Analisis Data Awal (Uji Keandalan Data)

Keandalan data dapat diuji menggunakan histogram dengan *software* ArcGIS 10.8. Beberapa metode dalam analisis geostatistik mensyaratkan bahwa data harus berdistribusi normal (kurva berbentuk lonceng), maka dari itu, digunakan metode histogram untuk mengubah data yang semula berbentuk *skewed* atau tidak simetris dalam distribusi nilai menjadi normal (Esri, 2021). Untuk data terdistribusi normal, mean dan median harus serupa, kemiringannya (*skewness*) harus mendekati nol, dan kurtosis atau indikator yang menunjukkan derajat keruncingan (*tailedness*) harus mendekati 3 (Kamble and Aggrawal, 2011).

Histogram disajikan dalam bentuk diagram batang yang menunjukkan tabulasi dari suatu data yang diatur berdasarkan ukuran (Esri, 2021). Cara untuk membuat histogram adalah dengan mengklik layer yang akan diuji, kemudian pilih *Geostatistical Analyst* pada toolbar *Geostatistical Analyst*, lalu pilih *Explore Data* dan pilih Histogram (Esri, 2021). Apabila histogram menunjukkan data yang sangat miring, maka linier, sehingga teknik *box-cox* atau logaritmik harus digunakan untuk membuat datanya normal (Kamble and Aggrawal, 2011).

B. Analisis Interpolasi dan Korelasi

Setelah dilakukannya uji keandalan data sekunder yang digunakan, selanjutnya adalah analisis sebaran logam dengan metode interpolasi lalu dilanjutkan dengan korelasi antara sungai banyuputih dengan logam di air tanah.

1. Analisis Metode Interpolasi

Pemetaan dilakukan dengan menggunakan data sekunder konsentrasi logam (Fe, Cd, Cu, Zn, Pb, dan Mn) tahun 2019 menggunakan dua metode interpolasi, yaitu metode IDW dan metode UK untuk mendapatkan estimasi nilai konsentrasi logam di area sekitarnya yang tidak tersampel. Berikut adalah rumus tiap-tiap metode:

a. Metode Interpolasi IDW

Berdasarkan jarak antara titik yang tidak tersampel ke setiap titik sampel bobot akan ditentukan dengan aturan Shepard (Razali and Wandu, 2019) seperti pada persamaan 3 berikut:

$$w_i = \frac{1}{d_{ij}^p} \dots \dots \dots (3)$$

Dimana w_i adalah bobot titik sampel ke- i ; d_{ij} adalah jarak dari yang tidak tersampel ke titik pengambilan sampel yang dapat dihitung menggunakan persamaan 4; dan p adalah singkatan dari *power* yang dapat diubah dan disesuaikan.

Bobot akan digunakan untuk memperkirakan nilai di lokasi yang tidak disampel menggunakan persamaan 4 untuk memastikan interpolator yang tidak bias, jumlah bobot yang dibutuhkan sama dengan 1.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n W_i X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \dots \dots \dots (4)$$

Z adalah titik yang tidak diketahui atau yang akan diinterpolasi; n adalah jumlah data.

b. Metode Interpolasi UK (Universal Kriging)

UK mengasumsikan bahwa mean $m(x)$ memiliki ketergantungan fungsional pada lokasi spasial dan disajikan dalam persamaan 5 (Kumar, 2007).

$$\mu_x = \sum_{i=1}^k a_i f_i(x) \dots \dots \dots (5)$$

Dimana a_i adalah titik yang akan diestimasi dari data; f_i merupakan fungsi dasar dari koordinat spasial; k adalah angka dari fungsi dalam pemodelan penyimpangan.

Adapun estimator UK untuk fungsi random $Z(x_i)$ disajikan pada persamaan 6

$$Z'(x_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i Z(x_i) \dots \dots \dots (6)$$

$Z'(x_0)$ merupakan nilai estimasi pada titik x_0 ; $Z(x_i)$ nilai yang diobservasi pada titik x_i ; N merupakan ukuran sampel; dan λ_i merupakan bobot yang dipilih untuk x_i sehingga memenuhi kondisi tak bias dan minimum varian.

2. Perhitungan Error untuk Validasi Interpolasi

Setelah mendapatkan hasil interpolasi dari kedua metode, langkah selanjutnya adalah membandingkan tingkat keakuratan dua metode berdasarkan nilai errornya. Adapun nilai error yang digunakan untuk validasi diantaranya adalah *Mean Error* (ME), dan *Root-Mean-Square-Error* (RMSE). Kedua validasi error ini digunakan untuk IDW maupun UK. Nilai validasi error lain yang digunakan adalah *Mean Standardized Error* (MSE), *Root-Mean-Square Standardized Error* (RMSSE), *Average Standard Error* (ASE) hanya digunakan untuk UK. Berikut persamaan dari setiap validasi error:

- *Mean Error* (ME)

Merupakan perbedaan rata-rata antara nilai yang diukur dengan nilai prediksi (Ali *et al.*, 2021). Disajikan dalam persamaan 7.

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{P}_i - \bar{O}_i)}{n} \dots\dots\dots (7)$$

- *Root-Mean-Square Error* (RMSE)

Menunjukkan seberapa dekat model memprediksi nilai. Semakin kecil RMSE, nilai yang dihasilkan semakin baik (Ali *et al.*, 2021). RMSE disajikan dalam persamaan 8.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{P}_i - \bar{O}_i)^2}{n}} \dots\dots\dots (8)$$

- *Mean Standardized Error* (MSE)

MSE merupakan rata-rata kesalahan standar yang nilainya harusnya mendekati 0 (Ali *et al.*, 2021). MSE disajikan dalam persamaan 9.

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n ((P_i) - (O_i)) / \sigma}{n} \dots\dots\dots (9)$$

- *Root-Mean-Square Standardized Error (RMSSE)*

Nilai RMSSE harus mendekati 1 maka lebih akurat daripada estimasi yang nilai RMSSE lebih besar daripada 1 (Ali *et al.*, 2021). Adapun rumus RMSSE disajikan dalam persamaan 10 berikut.

$$RMSSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\frac{((P_i) - (\bar{O}_i))^2}{\sigma(\bar{O}_i)} \right]}{n}} \dots\dots\dots (10)$$

- *Average Standard Error (ASE)*

ASE merupakan rata-rata kesalahan (Ali *et al.*, 2021). Adapun rumusnya disajikan dalam persamaan 11.

$$ASE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sigma^2}{n}} \dots\dots\dots (11)$$

Berikut adalah keterangan variabel error (Ali *et al.*, 2021):

- O_i merupakan nilai yang diamati/diukur
- P_i merupakan nilai prediksi
- n merupakan jumlah data
- σ merupakan standar deviasi dari kesalahan estimasi
- i merupakan nilai prediksi akan diestimasi
- \bar{O} adalah rata-rata nilai yang diamati
- \bar{P} adalah rata-rata nilai prediksi

3. Analisis Jarak Sumber Pencemar dengan Konsentrasi Logam

Setelah mendapatkan model interpolasi dari metode interpolasi yang paling akurat, kemudian melakukan analisis jarak sumber pencemar dengan konsentrasi logam menggunakan cara seperti pada halaman selanjutnya:

a. Teknik Kalkulasi Jarak

Pertama kali adalah menganalisis dengan menggunakan teknik kalkulasi jarak menggunakan *software* ILWIS 3.31 *Academic*.

b. Teknik *Cross-tab*

Langkah selanjutnya adalah mengidentifikasi konsentrasi logam dengan jarak alur sungai menggunakan teknik *cross-tab* dengan *software* ILWIS 3.31 *Academic*.

4. Uji Korelasi Pearson

Langkah setelah mendapatkan jarak antara konsentrasi logam dengan alur Sungai Banyuputih adalah menghitung korelasi antara kedua variabel dengan metode korelasi pearson menggunakan *Microsoft Excel*. Adapun caranya adalah menggunakan *function arguments* PEARSON dengan menggunakan syntax atau kalimat perintah dengan mengetik = PEARSON(array1,array2).

Kriteria penafsiran korelasi Pearson menurut Arikunto (2006) disajikan dalam **Tabel 3** berikut:

Tabel 3 Kriteria Penafsiran Korelasi Pearson

Indeks Korelasi	Kriteria Penafsiran
0,800 – 1,000	Sangat tinggi
0,600 – 0,799	Tinggi
0,400 – 0,599	Cukup tinggi
0,200 – 0,399	Rendah
0,000 – 0,199	Sangat rendah (tidak valid)

Sumber: Arikunto, 2006

3.3.3 Analisis Spasial

Pemetaan persebaran logam menggunakan *software* ArcGIS 10.8 pada kandungan konsentrasi logam air tanah dengan menggunakan data sekunder tahun 2019. Pemetaan persebaran logam dalam penelitian ini dilakukan dengan metode interpolasi. Sebelumnya, dilakukan perbandingan metode interpolasi untuk memperoleh metode dengan tingkat akurasi yang tinggi dengan membandingkan kedua metode interpolasi menggunakan validasi error. Setelah didapat asumsi-asumsi konsentrasi logam dari model interpolasi, dan menghasilkan persebaran logam, selanjutnya, menganalisis jarak konsentrasi logam dengan Sungai

Banyuputih menggunakan *software* ILWIS 3.31 *Academic*. Kalkulasi jarak ini sangat penting untuk mengidentifikasi korelasi konsentrasi logam air tanah dengan Sungai Banyuputih yang selanjutnya untuk menganalisis kemungkinan sumber pencemar air tanah dari Sungai Banyuputih. Semua hasil analisis digunakan untuk menghitung potensi risiko kesehatan masyarakat terhadap logam.

Adapun rangkuman analisis disajikan dalam **Tabel 4** berikut:

Tabel 4 Rangkuman Analisis yang Dilakukan

No.	Jenis Analisis	Tujuan
1	Analisi data awal	Menguji keandalan data
2	Analisis Interpolasi	Mendapatkan estimasi nilai konsentrasi logam
3	Perhitungan Error	Uji validasi keakuratan model interpolasi
4	Analisis Kalkulasi Jarak	Mengetahui jarak titik sampel dengan jarak alur sungai
5	Teknik <i>cross-tab</i>	Mengidentifikasi konsentrasi logam dengan jarak alur sungai
6	Uji Korelasi Pearson	Menganalisis korelasi konsentrasi logam dengan jarak dari alur sungai untuk mengetahui sumber pencemar



“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

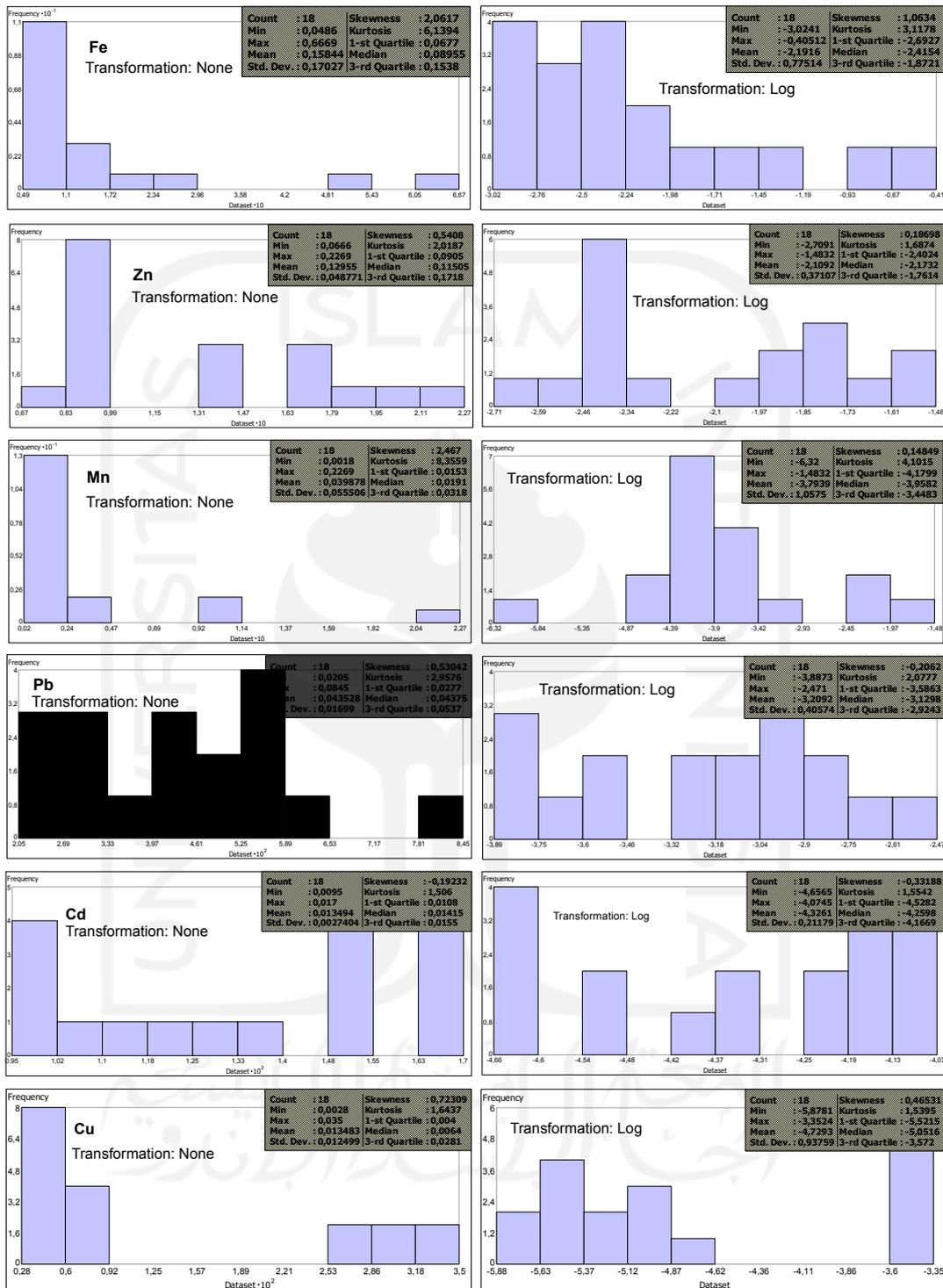
4.1. Analisis Karakteristik Sebaran Data

Data awal diuji karakteristiknya menggunakan histogram dan QQ plot untuk menguji normalitas data. Beberapa metode *geostatistical analyst* mensyaratkan bahwa data harus terdistribusi secara normal agar prediksi dari model interpolasi yang dihasilkan akurat (Kamble and Aggrawal, 2011).

4.1.1. Teknik Histogram (*Basic Statistic*)

Hasil histogram pada set data Fe, Zn, Mn, Pb, Cd, Cu disajikan pada **Gambar 5**. Teknik histogram untuk menguji parameter-parameter tersebut dipilih tanpa transformasi dan transformasi log. Pada studi ini tidak menggunakan transformasi *box-cox*, karena hasil transformasi *box-cox* untuk parameter-parameter tersebut sama seperti histogram sebelum ditransformasi. Sehingga transformasi *box-cox* sudah terwakilkan oleh histogram tanpa transformasi.

Histogram pertama adalah data dari logam Fe tanpa transformasi yang menghasilkan data terdistribusi tak normal, karena memiliki *skewness* sebesar 2,06 yang artinya sangat jauh dari nilai 0, dan kurtosis sangat jauh dari nilai 3, yaitu bernilai 6,13. Maka dari itu, transformasi diubah menjadi log. Setelah ditransformasi log, hasil menunjukkan bahwa data berbentuk bimodal dan miring ke kiri. Data tersebut masih belum terdistribusi normal, namun sudah lebih baik dari hasil sebelum ditransformasi. Adapun hasil perbedaan nilai mean dan median sebesar 0,21; *skewness* bernilai 3,1; dan kurtosis mendekati 3, yaitu 3,12. Pada transformasi log memiliki sebaran nilai konsentrasi 3,02 mg/l - 0,41 mg/l, dengan rata-rata -2,2 mg/l dan standar deviasi 0,78 mg/l.



Gambar 5 Histogram Tanpa Transformasi dan setelah Transformasi Log

Ringkasan nilai statistik dari Zn menunjukkan hasil data terdistribusi tidak normal tanpa transformasi dengan perbedaan nilai median dan mean sebesar 0,01 mg/l, dan nilai *skewness* 0,54, serta nilai kurtosis sebesar 2. Namun, hasil transformasi ini lebih baik daripada hasil setelah ditransformasi log. Karena hasilnya menunjukkan bahwa data lebih tidak terdistribusi secara normal dilihat dari kurtosis yang jauh dari nilai 3 (1,7). Sehingga, dipilih histogram tanpa transformasi dengan dihasilkan nilai minimal 0,07 mg/l, dan nilai maksimal sebesar 0,23 mg/l dengan nilai rata-rata 0,13 mg/l dan standar deviasi sebesar 0,05.

Adapun hasil statistik dan histogram dari parameter Mn menunjukkan bahwa data terdistribusi normal pada transformasi logaritmik. Data tersebut berbentuk unimodal dan miring ke kanan, dengan perbedaan nilai antara mean dan median sebesar 0,16 mg/l, dengan nilai *skewness* sebesar 0,15 dan kurtosis sebesar 4,1. Adapun Mn tanpa transformasi menunjukkan hasil yang jauh dari kata normal, karena memiliki nilai *skewness* sebesar 2,5, selain itu perbedaan nilai antara mean dan median sebesar 0,021 serta nilai kurtosis yang sangat jauh dari nilai 3, yaitu 8,4. Dari hasil data yang terdistribusi normal (histogram tanpa transformasi) memiliki variasi data dari -6,32 mg/l - 1,49 mg/l, dengan rata-rata -3,8 mg/l dan standar deviasi 1,06 mg/l.

Rangkuman statistik dari data Pb yang mendekati distribusi normal dihasilkan dari histogram tanpa transformasi dengan bentuk unimodal dan miring ke kanan. Perbedaan nilai mean dan median yang dihasilkan adalah 0 mg/l, nilai *skewness* sebesar 0,5, dan kurtosis 2,95. Selain itu, histogram tanpa transformasi menghasilkan variasi konsentrasi dari 0,02 mg/l - 0,085 mg/l dengan rata-rata konsentrasi -0,04 mg/l dan standar deviasi 0,02 mg/l. Adapun hasil histogram dengan transformasi logaritmik menunjukkan data lebih tidak terdistribusi normal karena kurtosis jauh dari nilai 3.

Karakteristik data Cd dengan histogram tanpa transformasi menghasilkan data yang mendekati distribusi normal jika dibanding dengan transformasi logaritmik. Histogram tanpa transformasi menghasilkan bentuk bimodal dengan *skewness* -0,19 artinya lebih mendekati 0 dibanding transformasi log. Histogram

tanpa transformasi menghasilkan nilai konsentrasi terendah hingga tertinggi dengan nilai 0,0095 mg/l – 0,017 mg/l, dengan konsentrasi rata-rata 0,013 mg/l dan standar deviasi sebesar 0,003 mg/l.

Karakteristik data parameter Cu pada histogram tanpa transformasi menghasilkan data mendekati distribusi normal, karena hasil histogram memiliki perbedaan nilai median dan mean sebesar 0,007, *skewness* 0,7, yang artinya mendekati 0, serta kurtosis sebesar 1,6. Walaupun kurtosis jauh dari nilai 3. Namun, hasil dari histogram setelah ditransformasi log menghasilkan nilai yang jauh dari syarat data distribusi normal, yaitu perbedaan mean dan median nilai lebih besar daripada sebelum ditransformasi (0,4). Dari hasil data Cu tanpa transformasi dihasilkan konsentrasi terendah hingga tertinggi sebesar 0,0028 – 0,035 mg/l. dengan konsentrasi rata-rata sebesar 0,013 mg/l dan standar deviasi 0,012 mg/l.

Jadi, pada hasil histogram ini menunjukkan bahwa data pada semua parameter (Fe, Mn, Zn, Pb, Cd, Cu) tidak terdistribusi normal, hal ini dikarenakan sebelum dataset ditransformasi, syarat statistika seperti *skewness*, kurtosis, dan perbedaan mean dan median tidak memenuhi standar distribusi normal. Adapun semua teknik transformasi tidak merubah hasil dari semua parameter secara signifikan (**Tabel 5**), terlebih pada parameter Zn, Pb, dan Cd. Hanya transformasi log untuk parameter Fe, Mn, dan Cu yang merubah sedikit kenormalitasannya,. Sehingga, didapat urutan normalitas data tanpa transformasi adalah $Pb > Zn > Cd > Cu$ dan data dengan transformasi log adalah $Mn > Fe$.

Tabel 5 Ringkasan Hasil Statistik Histogram pada Semua Parameter

No	Parameter	Transformasi	Mean-Median	<i>Skewness</i>	Kurtosis
1	Fe	Log	0,23	1,1	3,1
2	Zn	<i>None</i>	0,01	0,5	2
3	Mn	Log	0,17	0,15	4,1
4	Pb	<i>None</i>	0,00022	0,5	3
5	Cd	<i>None</i>	0,001	-0,19	1,5
6	Cu	<i>None</i>	0,007	0,7	1,6

4.1.2. Teknik QQ Plot (Plot Linearitas)

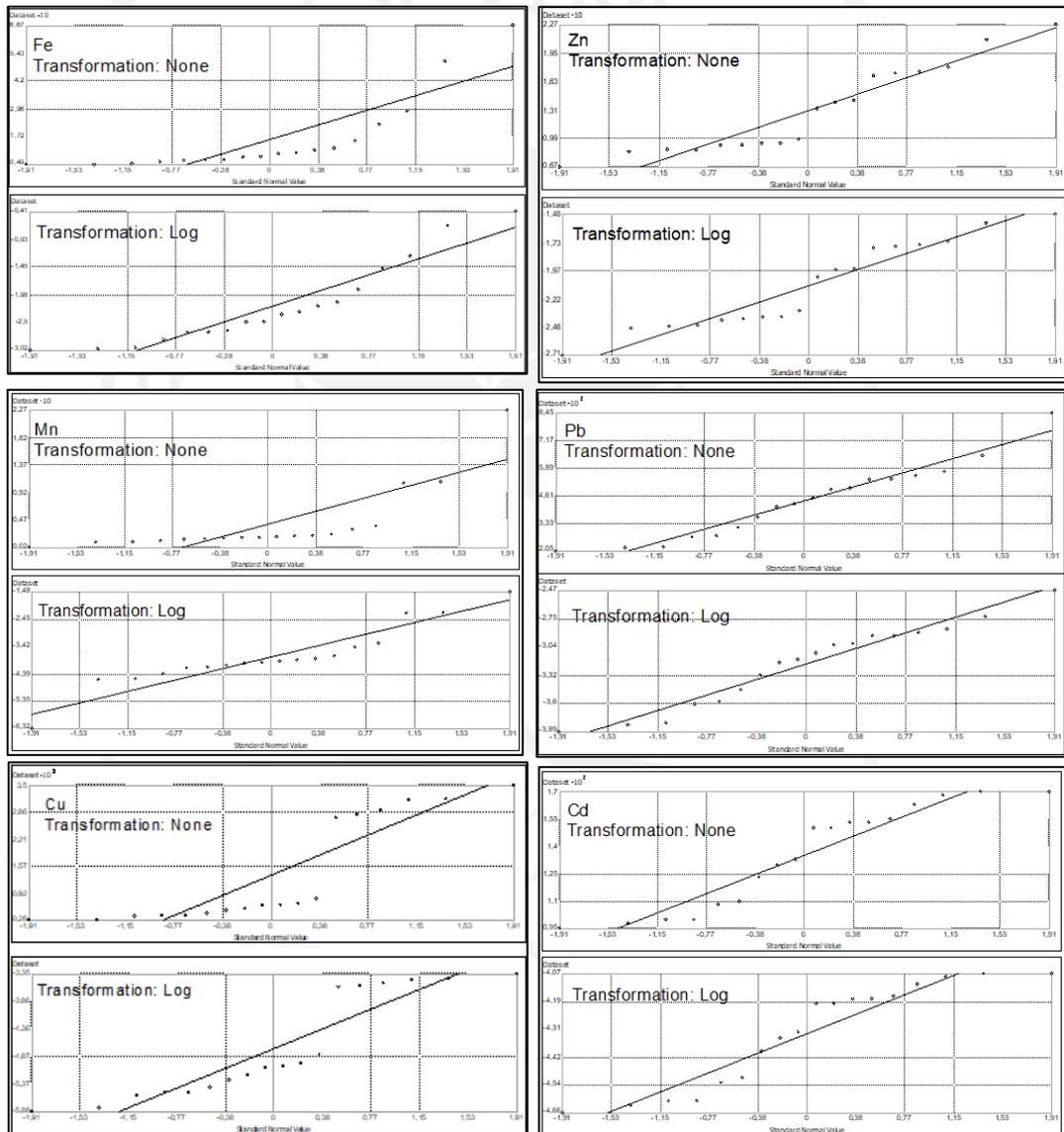
Gambar 6 telah disajikan hasil QQ plot setiap parameter. QQ plot merupakan salah satu distribusi statistik untuk menguji kenormalan suatu data, dengan distribusi normal plot sampel mengelompok pada garis lurus (Kalivas *et al.*, 2013). Jika data terdistribusi normal, maka titik-titik akan jatuh pada garis referensi 45 derajat, dan jika data tidak terdistribusi normal, maka akan menyimpang dari garis referensi (Kamble and Aggrawal, 2011).

Plot pertama yaitu data Fe tanpa transformasi menunjukkan tidak terdistribusi normal karena titik titik sebaran sampel Fe sangat menyimpang dari garis referensi atau garis linier. Karena data belum menunjukkan distribusi normal, maka dilakukan transformasi log. Setelah ditransformasi, sebaran data Fe menunjukkan bahwa data mendekati distribusi normal. Mengenai data Zn, QQ plot tanpa transformasi menunjukkan bahwa sebaran dari Zn mendekati normal. Dikatakan normal karena sebaran data lebih mendekati garis linier. Adapun jika sebaran Zn diuji dengan transformasi logaritmik menunjukkan sebaran jauh dari normal karena sangat menjauhi garis linier jika dibanding dengan QQ plot sebelum ditransformasi.

Adapun data dari parameter logam Mn, hasil uji menggunakan QQ plot tanpa transformasi, data belum terdistribusi normal, karena sebaran terlalu menyimpang dari garis linier. Maka dari itu, dilakukan transformasi logaritmik. Dan hasil setelah ditransformasi menghasilkan data yang mendekati normal. Hal ini dapat dilihat dari sebaran data yang mendekati garis linier. Uji dataset Pb dengan sebelum ditransformasi menghasilkan data dengan distribusi normal karena sebaran data mendekati garis linier. Adapun jika dataset dari Pb ditransformasi log, maka sebaran data sangat menjauhi garis linier, yang artinya sebaran data Pb tidak terdistribusi normal.

Plot dari data Cd tanpa transformasi menunjukkan sebaran data mendekati normal karena dilihat dari sebaran data yang mendekati garis referensi atau linier. Berbeda dengan hasil setelah ditransformasi log, sebaran data lebih menjauhi garis referensi, sehingga transformasi log dari dataset Cd tidak terdistribusi normal.

Adapun uji dataset Cu sebelum ditransformasi belum menunjukkan sebaran data yang normal karena masih menjauhi garis linier, maka dilakukan transformasi log. Hasil dari transformasi log juga belum mendekati garis. Namun, Cu tanpa transformasi menghasilkan hasil yang lebih baik daripada Cu dengan transformasi log. Maka, dataset Cu terdistribusi mendekati normal tanpa transformasi.



Gambar 6 Normal QQ Plot tanpa Transformasi dan setelah Transformasi Log

QQ plot menunjukkan hasil yang sama dengan hasil histogram pada semua parameter (Fe, Mn, Zn, Pb, Cd), bahwa dataset tidak terdistribusi normal, hal ini dikarenakan sebelum dataset ditransformasi, sebaran data tidak berada pada garis linier. Adapun semua teknik transformasi tidak merubah hasil semua parameter secara signifikan, terlebih pada parameter Zn, Pb, dan Cd dan Cu. Hanya transformasi log untuk parameter Fe, dan Mn yang merubah sedikit kenormalitasannya, tetapi hal ini pun hanya merubah menjadi sedikit mendekati normal karena sebaran dataset hanya sedikit mendekati garis linier. Sehingga, didapat urutan normalitas data tanpa transformasi adalah $Pb > Zn > Cd > Cu$ dan data dengan transformasi log adalah $Mn > Fe$.

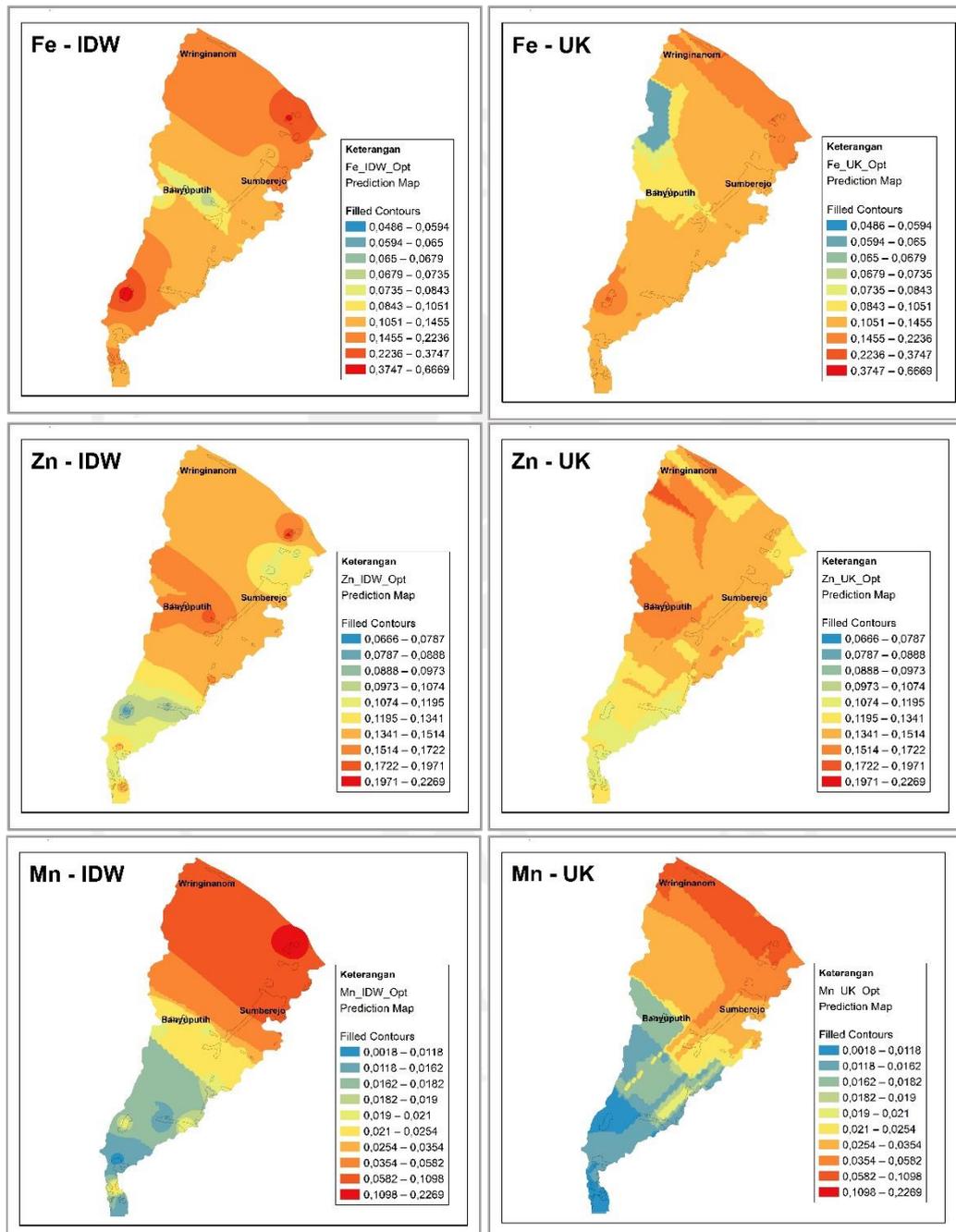
4.2. Analisis Perbandingan Teknik Interpolasi

4.2.1. Analisis Hasil Peta Interpolasi dengan Metode IDW dan UK

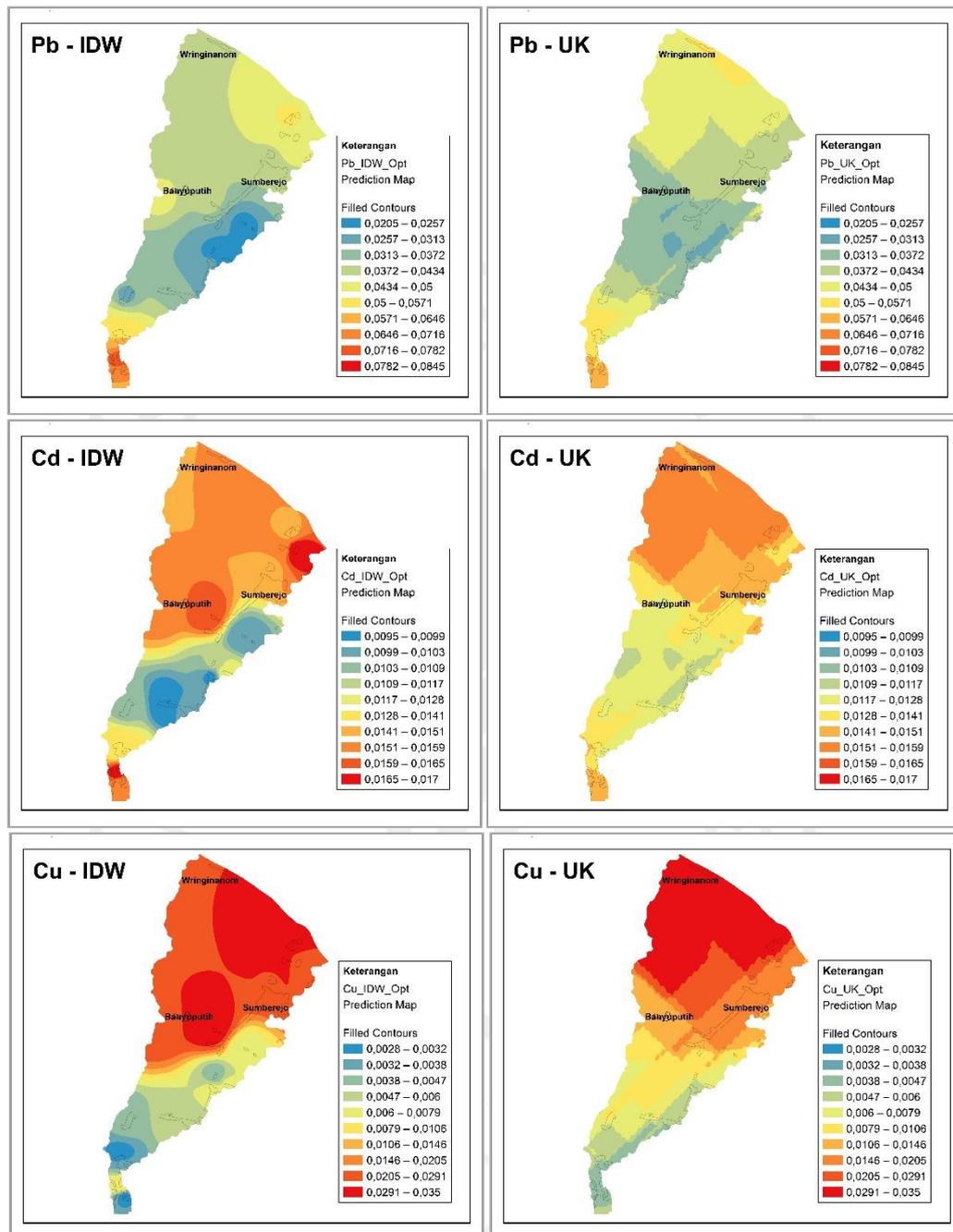
Pada **Gambar 7** disajikan peta hasil interpolasi Fe, Mn, Zn, serta **Gambar 8** disajikan hasil interpolasi Pb, Cd, Cu dari model interpolasi IDW dan UK. Semua parameter dinyatakan dalam mg/l dengan menggunakan 18 titik pengambilan sampel per masing-masing parameter. Dari 18 nilai sampel Fe memiliki rentang nilai sampel 0,049-0,07 mg/l, dan dihasilkan hasil interpolasi IDW dengan rentang nilai, yaitu 0,069-0,7 mg/l dan UK dengan rentang nilai 0,0486 – 0,7 mg/l. Mengenai nilai sampel Zn memiliki rentang 0,07-0,23 mg/l dan menghasilkan nilai interpolasi 0,0787-0,1971 mg/l dari metode IDW dan serta rentang nilai 0,1074 – 0,23 mg/l dari metode UK. Sedangkan parameter Mn dengan masukan nilai sampel 0,0018-0,23 mg/l menghasilkan nilai interpolasi dari IDW dan UK dengan rentang 0,0018-0,109 mg/l.

Kemudian Pb dengan masukan sampel 0,02-0,09 mg/l menghasilkan nilai rentang 0,02-0,0782 mg/l untuk model interpolasi IDW dan 0,0257-0,0646 untuk model interpolasi UK. Mengenai parameter Cd dengan masukan rentang nilai sampel 0,0095-0,017 mg/l, menghasilkan nilai prediksi dengan rentang nilai 0,0095-0,017 mg/l dari model interpolasi IDW dan pada interpolasi UK menghasilkan rentang nilai 0,0109-0,0165 mg/l. Serta Cu dengan masukan nilai

sampel 0,0028 – 0,035 mg/l menghasilkan rentang nilai prediksi dari hasil IDW sebesar 0,0028 – 0,035 mg/l dan dari UK sebesar 0,0032 – 0,035 mg/l.



Gambar 7 Hasil Peta Interpolasi IDW dan UK pada Parameter Fe, Zn, dan Mn



Gambar 8 Hasil Peta Interpolasi IDW dan UK pada Parameter Pb, Cd, dan Cu

Kedua metode tersebut tidak menghasilkan perbedaan yang cukup signifikan dari segi visual (**Gambar 7 dan 8**), Namun, memang pada Pb, Fe, Mn, dan Cd terdapat perbedaan zonasi antar keempatnya. Pb, Fe, Mn, dan Cd terdapat zona dengan konsentrasi sangat tinggi dari hasil interpolasi IDW, namun pada hasil

UK tidak. Hal ini karena pada kriging menghasilkan nilai yang lebih rendah dari data asli, peristiwa ini disebut efek *smoothing* (Myers, 1991). Efek *smoothing* pada kriging terjadi apabila terdapat data yang jauh dari lokasi yang diestimasi (Deutsch, 2003). Adanya efek *smoothing* ini merupakan salah satu kelemahan dari UK.

Metode geostatistik dan deterministik menunjukkan perbedaan dalam *surface smoothness*. Interpolasi geostatistik dikenal sebagai metode estimasi optimal yang tidak bias, oleh karena itu, model interpolasi UK lebih baik daripada yang lain secara teori (Kalivas *et al.*, 2013). Hal ini dapat dilihat dari kehalusan permukaan (*smoothness*), bahwa hasil peta dari UK lebih halus dibanding dengan IDW karena menghasilkan peta yang relatif kontinu, dan permukaannya berubah secara bertahap. Perubahan secara bertahap ini merupakan salah satu kelebihan karena dapat mengubah distribusi yang semula acak menjadi lebih teratur (ITC, 2001). Hal ini disebabkan karena UK dapat menghasilkan prediksi yang terfilter, karena dapat memilih prediktornya sehingga UK disebut interpolator yang tidak bias (Ahmad *et al.*, 2021). IDW tampaknya lebih kasar untuk semua parameter. *Smoothness* juga dipengaruhi oleh *interpolation of neighbors averaged* dan parameter model (Falivene *et al.*, 2010).

Dari uraian di atas, maka parameter Mn dengan menggunakan dua metode interpolasi menghasilkan rentang nilai yang sama dari rentang nilai masukan untuk parameter Mn. Sedangkan parameter lainnya (Fe, Zn, Pb, Cd, Cu) hampir sama dengan nilai masukan atau nilai sampel. Sehingga dapat dikatakan bahwa kedua metode tersebut cukup menggambarkan kondisi yang sebenarnya. Adapun mengenai model spasial, UK lebih baik dalam menghasilkan kehalusan untuk semua parameter daripada IDW. Namun UK memiliki kelemahan yaitu menghasilkan nilai yang lebih rendah atau lebih tinggi dari nilai masukan. Mengenai kelebihan IDW, menghasilkan nilai yang sama dengan nilai masukan, namun memiliki kekurangan dalam kehalusan permukaan.

4.2.2. Analisis Perbandingan Hasil Uji Validasi-statistik

Pada penelitian ini, telah dilakukan interpolasi IDW dan UK yang dioptimalkan, seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 6** dan **7**.

Model interpolasi yang paling akurat adalah model interpolasi yang memiliki nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) paling kecil, dan nilai mean semakin mendekati 0 (Arslan and Ayyildiz Turan, 2015). Namun, jika nilai mean tidak menunjukkan nilai terendah saat RMSE terendah, maka metode yang paling akurat adalah metode yang memiliki nilai RMSE terendah (Arslan and Ayyildiz Turan, 2015). Selain itu, pada penelitian Hua et al. (2009) yang membandingkan IDW dan kriging juga menyimpulkan model paling akurat berdasarkan nilai RMSE yang lebih rendah.

Tabel 6 Hasil Perhitungan Error dari Interpolasi IDW pada Setiap Parameter

Parameter	Power	Root Mean Square	Mean
Fe	1	0,181	-0,013
Zn	1	0,0539	0,000
Mn	1,040	0,045	-0,005
Pb	1,892	0,010	-0,00002
Cd	4,872	0,0017	-0,00018
Cu	4,458	0,006	-0,001

Warna merah: Nilai yang paling baik

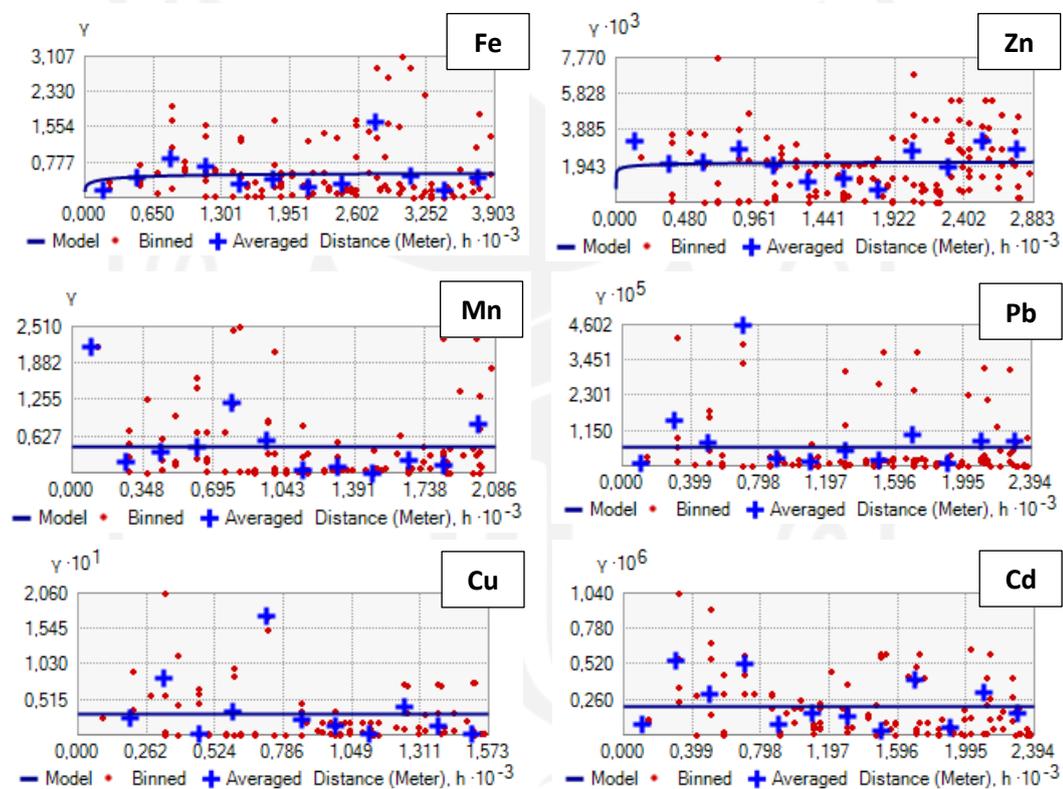
Tabel 7 Hasil Perhitungan Error dari Interpolasi *Universal Kriging* pada Setiap Parameter

	Mean	Root-Mean-Square-Error	Average Standard Error	Mean Standardized Error	Root-Mean-Square-Standardized Error
Fe	-0,026	0,176	1,128	-0,022	0,154
Zn	0,001	0,051	0,050	0,030	1,024
Mn	-0,011	0,0449	1,008	-0,010	0,044
Pb	0,00006	0,014	0,003	0,010	5,041
Cd	-0,00009	0,00225	0,000	-0,140	4,534
Cu	-0,003	0,009	0,194	-0,015	0,045

Warna merah : Nilai yang paling baik

Sehingga, pada penelitian ini dihasilkan bahwa model interpolasi IDW yang dioptimalkan lebih akurat untuk parameter Pb, Cd, dan Cu. Hal ini kemungkinan

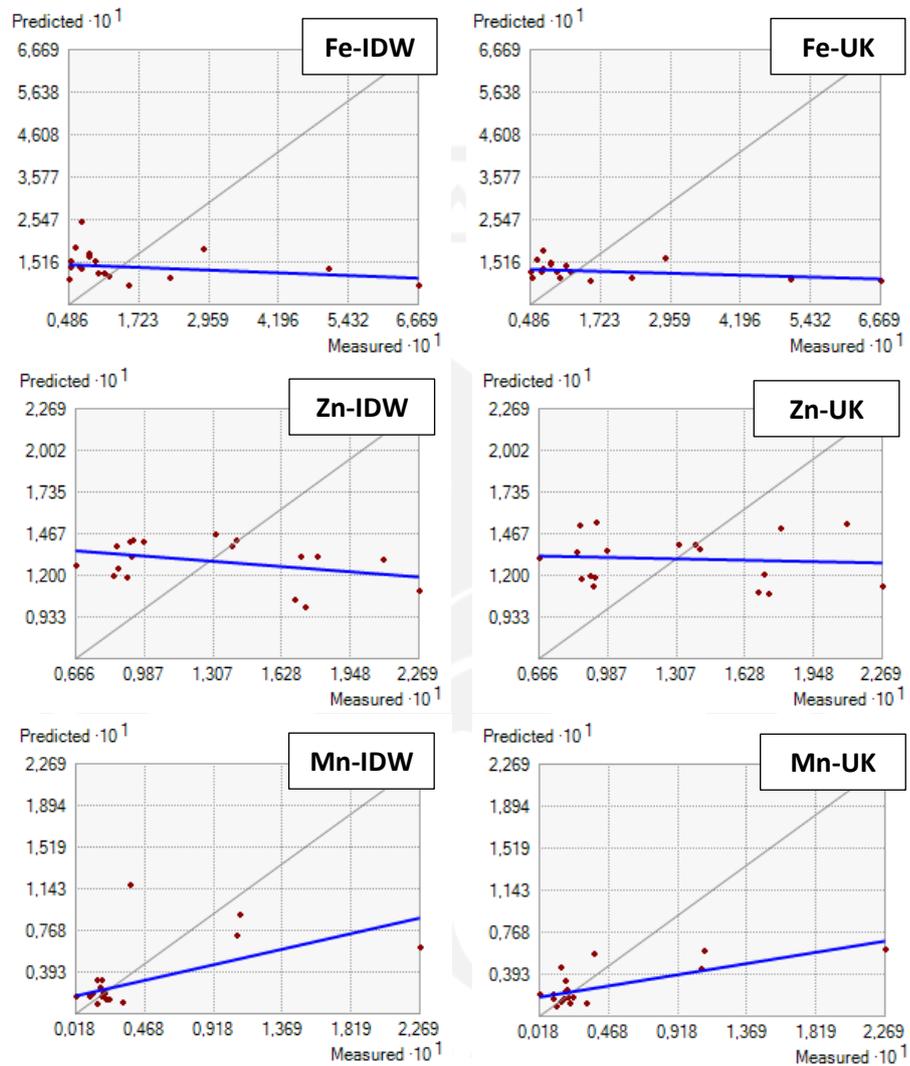
karena nilai power ketiganya lebih tinggi. Optimasi model interpolasi IDW dapat dicapai dengan mengubah nilai *power*, dengan demikian RMSE akan menghasilkan nilai yang rendah (Bashir and Fouli, 2015). Model interpolasi UK akurat dalam mengestimasi Mn dan Zn. Interpolasi UK juga akurat untuk parameter Fe, namun dari nilai error, terlebih pada RMSE tidak mendekati nilai 0, sehingga hasil interpolasi tidak maksimal, namun dari hasil metode lain, yaitu IDW, hasil kriging untuk Fe lebih baik.



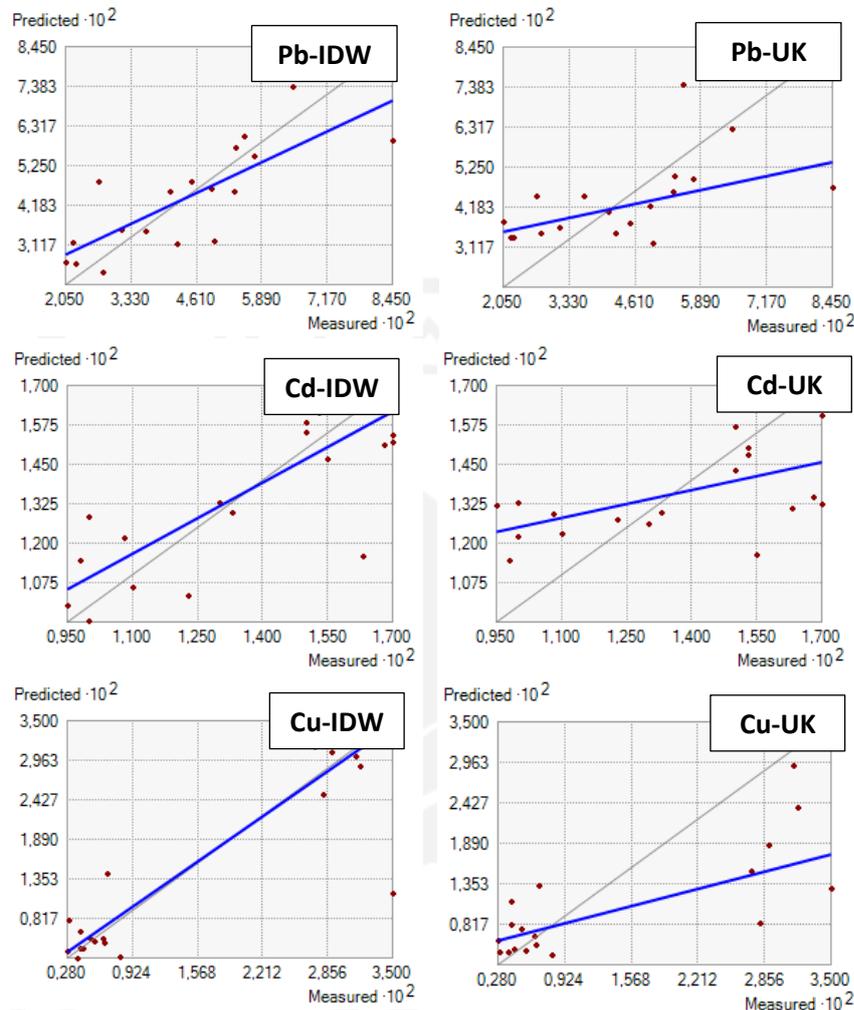
Gambar 9 Semivariogram Metode Interpolasi IDW dan UK setiap Parameter

Namun demikian nilai RMSE dan ME antara IDW dan UK tidak jauh berbeda. Pada kasus ini, nilai RMSSE dari interpolasi UK menghasilkan nilai yang jauh dari 1, hal ini dikarenakan data awal tidak terdistribusi dengan baik, dan ukuran sampel yang rendah. Kedua metode tersebut memiliki kelebihan masing-masing. UK merupakan interpolator yang tidak bias karena memiliki semivariogram yang dapat mengatur nilai yang digunakan sebagai prediktornya (Kalivas *et al.*, 2013).

Sedangkan IDW menghasilkan keluaran yang sama persis dengan masukan karena IDW merupakan interpolator eksak.



Gambar 10 Perbandingan Cross Validation dari Setiap Metode Interpolasi dari parameter Fe, Zn, dan Mn



Gambar 11 Perbandingan Cross Validation dari Setiap Metode Interpolasi dari parameter Pb, Cd, dan Cu

Semivariogram menunjukkan data berkorelasi secara spasial (Kamble and Aggrawal, 2011), dari interpolasi UK yang disajikan pada **Gambar 9**, yang merupakan semivariogram yang dihasilkan dari model interpolasi UK yang dioptimalkan. Pada parameter Fe menunjukkan kisaran jangkauan semivariogram, sekitar 0,55 meter. Nilai ini merepresentasikan jarak terjauh dengan nilai korelasi. Selain Fe, hasil semivariogram dari parameter-parameter lainnya terlihat stabil dari jangkauan 0 meter. Selain jangkauan, adanya korelasi spasial juga ditunjukkan dari titik-titik merah. Apabila titik-titik merah semakin berdekatan antar satu sama lain berarti menunjukkan bahwa data semakin memiliki ketergantungan secara spasial.

Model interpolasi IDW dan UK menghasilkan *cross validation* yang dapat menguji validitas suatu model interpolasi. Nilai dari *cross validation* dari kedua interpolasi disajikan pada **Gambar 10** dan **11** suatu model interpolasi dikatakan memiliki hasil prediksi yang akurat apabila garis biru mendekati garis abu-abu dengan perbandingan 1:1 (Kamble and Aggrawal, 2011). Sehingga, dari **Gambar 11** hanya Cu dengan metode IDW merupakan metode interpolasi yang menghasilkan prediksi paling maksimal.

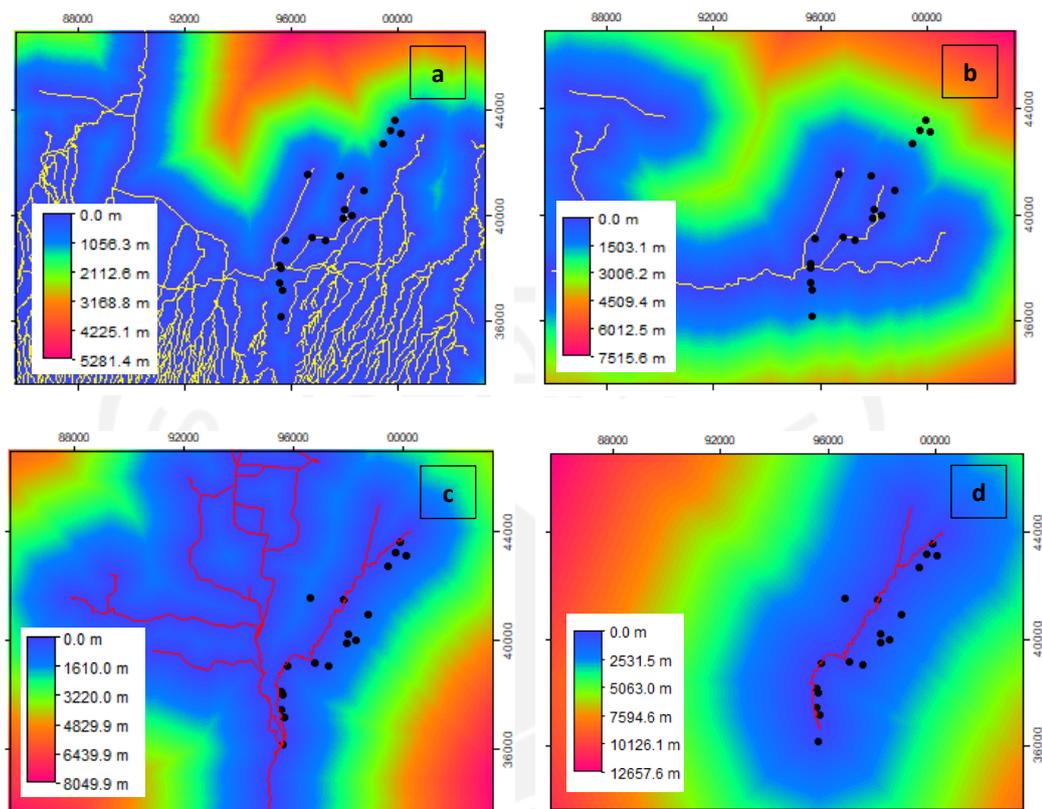
Selain Cu, IDW menghasilkan prediksi yang akurat untuk parameter Pb dan Cd, walaupun garis biru tidak benar-benar mendekati garis abu-abu dengan 1:1. Untuk parameter Fe, Mn, dan Zn (**Gambar 10**) hasil prediksi yang akurat adalah dengan menggunakan interpolasi UK. Walaupun garis biru sangat jauh dari garis abu-abu, namun masih dapat dikatakan lebih baik jika dibanding dengan Fe, Mn, dan Zn yang menggunakan metode interpolasi IDW.

Dari uraian di atas dapat ditarik kesimpulan bahwa model interpolasi IDW lebih akurat untuk parameter Pb, Cu, dan Cd dengan urutan keakuratan adalah $Cu > Cd > Pb$ dan model interpolasi UK lebih akurat untuk parameter Fe, Mn, dan Zn dengan urutan keakuratan adalah $Mn > Zn > Fe$.

4.3. Analisis Korelasi Sumber Pencemar

4.3.1. Analisis Perhitungan Jarak Jaringan

Peta kalkulasi jarak (**Gambar 8**) digunakan untuk memberikan informasi klasifikasi jarak dari jaringan netral maupun asam dengan 6 sub klasifikasi. Peta kalkulasi jarak tersebut meliputi jarak dengan jaringan sungai irigasi netral, jaringan sungai netral, jaringan sungai irigasi asam, dan jaringan sungai asam. Adapun jaringan sungai irigasi netral (**Gambar 12a**) memiliki jarak dari 0-5281,4 m; jarak dengan sungai netral (**Gambar 12b**) dari 0-7515,6 m; jaringan sungai drainase asam (**Gambar 12c**) memiliki jarak dari 0-8049,9 m; dan jaringan sungai asam (**Gambar 12d**) memiliki jarak dari 0-12657,6 m.



Gambar 12 Peta Kalkulasi Jarak (a) Irigasi Netral (b) Sungai Netral (c) Drainase Asam (d) Sungai Asam

Tabel 8 Hasil *Cross-tab* Logam dengan Jaringan Drainase Netral

Jarak (m)	Konsentrasi (mg/l)					
	Fe	Zn	Mn	Pb	Cd	Cu
Drainase Netral						
27,1	0,0833	0,0839	0,0105	0,0362	0,0095	0,0050
58,1	0,0677	0,1319	0,0018	0,0225	0,0110	0,0040
58,1	0,1200	0,1739	0,0194	0,0537	0,0133	0,0028
73,6	0,0500	0,1793	0,0171	0,0495	0,0155	0,0281
77,4	0,0958	0,0905	0,0238	0,0313	0,0100	0,0055
96,8	0,0690	0,0916	0,0153	0,0573	0,0130	0,0038
135,5	0,1119	0,1718	0,0181	0,0277	0,0098	0,0065
209,1	0,1005	0,1413	0,0204	0,0205	0,0123	0,0063
216,8	0,6669	0,0666	0,0215	0,0270	0,0108	0,0040
309,8	0,0514	0,0859	0,0104	0,0555	0,0170	0,0044
464,6	0,0828	0,1689	0,0126	0,0648	0,0153	0,0030
476,3	0,1538	0,1395	0,0188	0,0220	0,0100	0,0068

511,1	0,2267	0,0928	0,0318	0,0845	0,0168	0,0080
580,8	0,0486	0,2099	0,0157	0,0423	0,0163	0,0350
685,3	0,2855	0,0982	0,1093	0,0452	0,0170	0,0273
1076,4	0,5080	0,2269	0,2269	0,0536	0,0150	0,0314
1095,8	0,0702	0,0932	0,0370	0,0489	0,0153	0,0318
1111,3	0,0599	0,0858	0,1074	0,0410	0,0150	0,0290

Tabel 9 Hasil *Cross-tab* Logam dengan Sungai Netral

Jarak (m)	Konsentrasi (mg/l)					
	Sungai Netral	Fe	Zn	Mn	Pb	Cd
27,1	0,0833	0,0839	0,0105	0,0362	0,0095	0,0050
58,1	0,0677	0,1319	0,0018	0,0225	0,0110	0,0040
58,1	0,1200	0,1739	0,0194	0,0537	0,0133	0,0028
73,6	0,0500	0,1793	0,0171	0,0495	0,0155	0,0281
77,4	0,0958	0,0905	0,0238	0,0313	0,0100	0,0055
96,8	0,0690	0,0916	0,0153	0,0573	0,0130	0,0038
135,5	0,1119	0,1718	0,0181	0,0277	0,0098	0,0065
209,1	0,1005	0,1413	0,0204	0,0205	0,0123	0,0063
216,8	0,6669	0,0666	0,0215	0,0270	0,0108	0,0040
476,3	0,1538	0,1395	0,0188	0,0220	0,0100	0,0068
580,8	0,0486	0,2099	0,0157	0,0423	0,0163	0,0350
619,5	0,2267	0,0928	0,0318	0,0845	0,0168	0,0080
848	0,0828	0,1689	0,0126	0,0648	0,0153	0,0030
1649,5	0,0514	0,0859	0,0104	0,0555	0,0170	0,0044
1843,1	0,0599	0,0858	0,1074	0,0410	0,0150	0,0290
2435,5	0,0702	0,0932	0,0370	0,0489	0,0153	0,0318
2532,3	0,2855	0,0982	0,1093	0,0452	0,0170	0,0273
2919,5	0,5080	0,2269	0,2269	0,0536	0,0150	0,0314

Analisis lebih lanjut menunjukkan hasil *cross-tab* dengan jaringan drainase asam (**Tabel 10**) dan (**Tabel 11**) bahwa konsentrasi logam sebagian besar memiliki konsentrasi yang lebih besar pada jarak yang dekat dengan kedua jaringan tersebut.

Tabel 10 Hasil *Cross-tab* Logam dengan Jaringan Drainase Asam

Jarak (m)	Konsentrasi (mg/l)					
Drainase Asam	Fe	Zn	Mn	Pb	Cd	Cu
0	0,0486	0,2099	0,0157	0,0423	0,0163	0,0350
54,2	0,0514	0,0859	0,0104	0,0555	0,0170	0,0044
73,6	0,5080	0,2269	0,2269	0,0536	0,0150	0,0314
81,3	0,6669	0,0666	0,0215	0,0270	0,0108	0,0040
120	0,0828	0,1689	0,0126	0,0648	0,0153	0,0030
135,5	0,2267	0,1739	0,0318	0,0537	0,0133	0,0080
135,5	0,0677	0,0928	0,0018	0,0845	0,0168	0,0028
174,2	0,0690	0,0916	0,0153	0,0573	0,0130	0,0038
220,7	0,0833	0,0839	0,0105	0,0362	0,0095	0,0050
325,2	0,0702	0,0932	0,0370	0,0489	0,0153	0,0318
460,8	0,0599	0,0858	0,1074	0,0410	0,0150	0,0290
611,8	0,2855	0,0982	0,1093	0,0452	0,0170	0,0273
739,6	0,0958	0,0905	0,0238	0,0313	0,0100	0,0055
762,8	0,1200	0,1319	0,0194	0,0225	0,0110	0,0040
859,6	0,1119	0,1718	0,0181	0,0277	0,0098	0,0065
940,9	0,0500	0,1793	0,0171	0,0495	0,0155	0,0281
1033,8	0,1538	0,1395	0,0188	0,0220	0,0100	0,0068
1146,1	0,1005	0,1413	0,0204	0,0205	0,0123	0,0063

Tabel 11 Hasil *Cross-tab* Logam dengan Jaringan Sungai Asam

Jarak (m)	Konsentrasi (mg/l)					
Sungai Asam	Fe	Zn	Mn	Pb	Cd	Cu
0	0,0486	0,2099	0,0157	0,0423	0,0163	0,0350
73,6	0,5080	0,2269	0,2269	0,0536	0,0150	0,0314
81,3	0,6669	0,0666	0,0215	0,0270	0,0108	0,0040
120	0,0828	0,1689	0,0126	0,0648	0,0153	0,0030
135,5	0,0677	0,0928	0,0018	0,0845	0,0133	0,0028
135,5	0,2267	0,1739	0,0318	0,0537	0,0168	0,0080
174,2	0,0690	0,0916	0,0153	0,0573	0,0130	0,0038
220,7	0,0833	0,0839	0,0105	0,0362	0,0095	0,0050
325,2	0,0702	0,0932	0,0370	0,0489	0,0153	0,0318
460,8	0,0599	0,0858	0,1074	0,0410	0,0150	0,0290
511,1	0,0514	0,0859	0,0104	0,0555	0,0170	0,0044
611,8	0,2855	0,0982	0,1093	0,0452	0,0170	0,0273
739,6	0,0958	0,0905	0,0238	0,0313	0,0100	0,0055

762,8	0,1200	0,1319	0,0194	0,0225	0,0110	0,0040
859,6	0,1119	0,1718	0,0181	0,0277	0,0098	0,0065
940,9	0,0500	0,1793	0,0171	0,0495	0,0155	0,0281
1033,8	0,1538	0,1395	0,0188	0,0220	0,0100	0,0068
1146,1	0,1005	0,1413	0,0204	0,0205	0,0123	0,0063

Dari hasil analisis di atas dapat diindikasikan bahwa panjang jaringan sungai asam akan mempengaruhi sebaran dispersi parameter logam dalam air tanah maupun tanah permukaan. Logam akan bergerak lebih tinggi dan sebaran dispersi akan lebih cepat melalui proses infiltrasi (Lou *et al.*, 2017). Maka semakin asam suatu jaringan, konsentrasi logam di air tanah maupun air permukaan akan semakin tinggi dibandingkan dengan jarak jaringan netral (Kovács *et al.*, 2012). Sebab pada jaringan dengan kondisi netral akan berkontribusi pada pengenceran atau dilusi logam dalam air tanah maupun tanah permukaan, sehingga terjadi penurunan konsentrasi sebelum mencapai akuifer tanah (Kovács *et al.*, 2012).

4.3.2. Analisis Hasil Korelasi

Analisis korelasi dilakukan untuk membedakan sumber pencemar (drainase netral, jaringan netral, drainase asam, dan sungai asam). Sumber pencemar logam dilakukan dengan menggunakan metode. Analisis korelasi dilakukan untuk 18 logam yang diamati pada tahun 2019.

Hasil **Tabel 12** menunjukkan bahwa logam Mn, Cd, dan Cu berkorelasi positif dan kuat terhadap jaringan netral (saluran netral dan drainase netral), mengindikasikan jaringan netral mempengaruhi keempat logam di air tanah dan parameter tersebut tidak dipengaruhi oleh jaringan asam. Dimana arti dari korelasi tersebut menunjukkan bahwa konsentrasi logam Mn, Cd, dan Cu akan berkurang seiring berkurangnya jarak jaringan netral. Hal ini disebabkan karena jaringan netral berkontribusi dalam pengenceran logam akibat peristiwa dilusi atau pengenceran (Kovács *et al.*, 2012). Sehingga, sebelum masuk ke akuifer, terjadi penurunan konsentrasi logam oleh air netral.

Tabel 12 Hasil Analisis Korelasi Konsentrasi Logam Dengan Jaringan Netral dan Asam

	Saluran Netral	Drainase Netral	Drainase Asam	Sungai Asam
Fe	0,2600	0,2006	-0,2404	-0,2933
Zn	0,0228	0,0808	0,0544	-0,0083
Mn	0,7716	0,7048	-0,1340	-0,1764
Pb	0,2940	0,2584	-0,6268	-0,5960
Cd	0,6096	0,5410	-0,4220	-0,3434
Cu	0,6499	0,7318	-0,0723	-0,1269

Warna merah: Korelasi kuat

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa Mn, Cd, dan Cu tidak bersumber dari jaringan asam (Sungai Banyuputih), akan tetapi kemungkinan terdapat aktivitas lain yang menjadi sumber penyumbang keempat logam tersebut ke dalam air tanah. Adapun aktivitasnya diantaranya adalah aktivitas domestik penyumbang limbah seperti kegiatan MCK, aktivitas agrikultur karena penggunaan pupuk (Cai and Li, 2022). Mengenai logam Fe, dan Zn, berkorelasi sangat rendah dengan jaringan asam maupun netral. Hal ini diindikasikan bahwa, jaringan netral tidak berkontribusi dalam pengenceran kedua logam tersebut di air tanah, serta jaringan asam juga tidak menyumbangkan Fe dan Zn di dalam air tanah. Selain Fe dan Zn merupakan unsur alami yang berada di lingkungan (Mihaljevic, 1999), juga terdapat indikasi lain bahwa adanya Fe dan Zn disebabkan karena input suatu aktivitas, seperti aktivitas domestik dan agrikultur yang menyumbang kedua logam tersebut ke dalam tanah dan mencapai akuifer.

Adapun yang berkorelasi kuat dengan jaringan asam (drainase asam dan sungai asam) adalah logam Pb. Hasil menunjukkan bahwa Pb memiliki korelasi negatif, sehingga mengindikasikan bahwa jaringan asam merupakan sumber pencemar yang menyumbang Pb ke dalam air tanah, karena korelasi negatif menunjukkan bahwa konsentrasi Pb akan semakin meningkat seiring meningkatnya jarak dengan jaringan asam.

Dari analisis di atas, dapat disimpulkan bahwa jaringan asam (drainase dan sungai asam) memainkan peran penting dalam distribusi konsentrasi logam **Pb**.

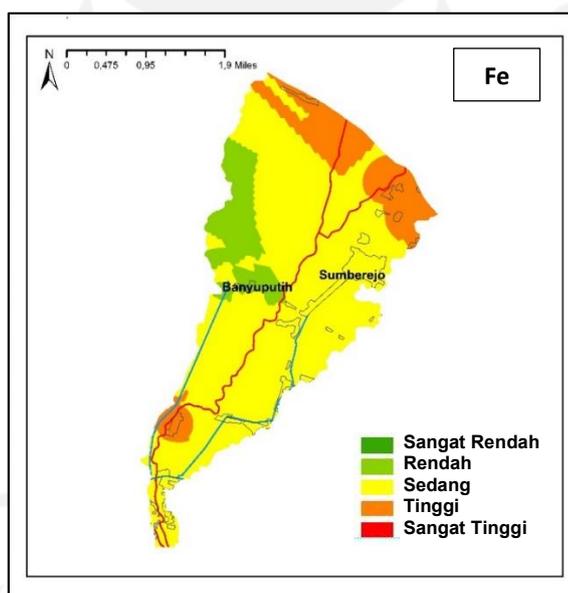
4.4. Potensi Paparan Logam Berdasarkan Peta Zona Bahaya

4.4.1. Analisis Peta Zona Bahaya Logam

Zona bahaya logam diklasifikasikan menjadi 5 kategori, yaitu kategori sangat rendah, kategori rendah, kategori sedang, kategori tinggi, dan kategori sangat tinggi. Dari hasil uji validasi metode interpolasi pada analisis sebelumnya, disajikan peta zonasi dengan interpolasi yang paling akurat untuk setiap parameter logam.

A. Fe

Zonasi sebaran logam Fe pada daerah penelitian ditunjukkan pada **Gambar 13** logam Fe terdapat 3 zona, yaitu rendah (0,0604-0,0882 mg/l), zona sedang (0,0882-0,1534 mg/l), dan zona tinggi (0,1534-0,3067 mg/l).



Gambar 13 Peta Zona Bahaya Logam Fe

Apabila dilihat berdasarkan potensi paparan ke permukimannya, desa yang masuk ke dalam zona bahaya sedang adalah Sumberejo dan Bantal, dan desa dengan zona bahaya tinggi terdapat pada desa Sumberejo bagian utara dan juga Wringinanom.

Adanya Fe di dalam air tanah berasal dari sumber alami karena merupakan salah satu unsur dalam tanah dan berasal dari aktivitas gunung

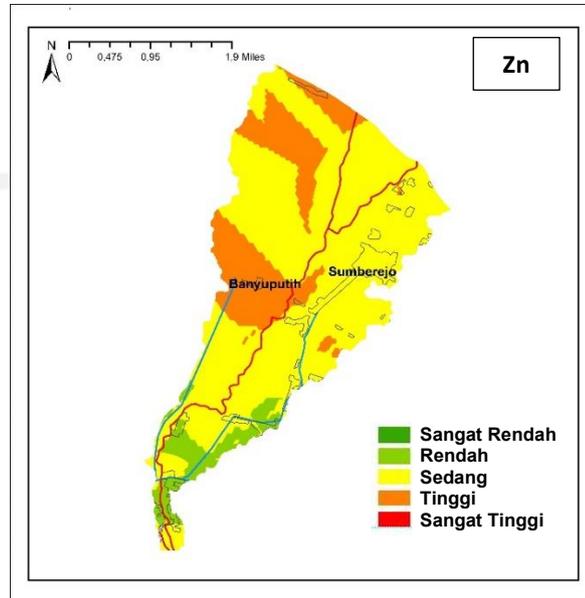
berapi (Spurgeon *et al.*, 2008). Selain itu karena adanya input dari aktivitas domestik dan agrikultur masyarakat sekitar yang menyumbang Fe ke dalam air tanah (Spurgeon *et al.*, 2008). Zona bahaya dengan Fe tinggi di Sumberejo paling utara dan Wringinanom ini terjadi karena adanya akumulasi logam ini, karena lokasinya yang merupakan dataran rendah, dimana logam akan meningkat karena adanya akumulasi menuju elevasi rendah (Ding *et al.*, 2017). Pada bagian Sumberejo dengan zona bahaya sedang memiliki sumber pencemar yang sama dengan zona bahaya tinggi, namun karena elevasinya tidak terlalu rendah, sehingga tidak ada akumulasi Fe, sehingga zona tersebut memiliki konsentrasi yang sedang.

Zona bahaya rendah berlokasi di Desa Banyuputih. Konsentrasi Fe rendah ini diindikasikan bahwa kegiatan agrikultur di Banyuputih tidak sebesar di Sumberejo yang merupakan zona bahaya tinggi. Hal ini dapat dilihat dari luas tanah sawah di Kecamatan Banyuputih terutama pada Desa Banyuputih dan Sumberejo. Sehingga menyebabkan lebih sedikit input agrikultur yang menyumbang Fe ke dalam air tanah. Jumlah penduduk Banyuputih juga tidak sebesar dengan jumlah penduduk Sumberejo, sehingga diindikasikan bahwa hanya sedikit aktivitas domestik yang menyumbang Fe ke dalam air tanah sehingga konsentrasi Fe di Banyuputih rendah.

B. Zn

Hasil analisis (**Gambar 14**) menunjukkan bahwa Desa Banyuputih merupakan zona bahaya Zn dengan kategori tinggi. Hal ini diindikasikan bahwa terdapat input antropogenik yang menyebabkan Zn di Banyuputih berkonsentrasi tinggi (0,1496-0,1857 mg/l). Chen *et al.* 2016 menginformasikan bahwa Zn pada lingkungan dipengaruhi oleh aktivitas manusia seperti aktivitas agrikultur, hingga penumpukan limbah padat. Aktivitas antropogenik di Banyuputih adalah aktivitas pertanian, karena pertanian di wilayah tersebut cukup tinggi, sehingga penggunaan pupuk akan menyumbang parameter Zn ke air tanah. Selain itu juga adanya

aktivitas domestik yang limbahnya dibuang ke lingkungan tanpa mengalami proses pengolahan.



Gambar 14 Peta Zona Bahaya Logam Zn

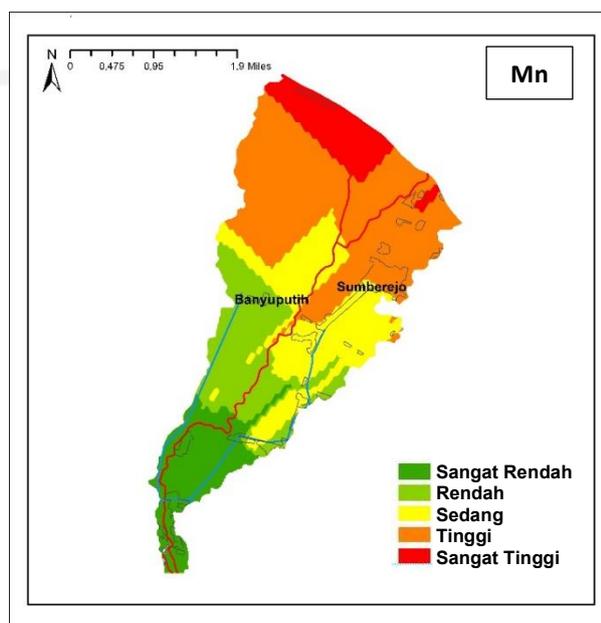
Desa Wringinanom menjadi desa dengan zona Zn tinggi. Hal ini diindikasikan bahwa Zn dari aktivitas domestik dan agrikultur terakumulasi dalam air tanah karena daerah Wringinanom yang berada di dataran rendah. Adapun desa Sumberejo masuk ke dalam kategori sedang (0,1181-0,1496 mg/l). Hal ini dikarenakan adanya akumulasi Zn dari zona rendah (0,0906-0,1181 mg/l), yaitu Desa Bantal yang bersumber dari aktivitas agrikultur dan domestik.

C. Mn

Gambar 15 disajikan peta zonasi logam Mn menggunakan interpolasi UK yang sudah dianalisis keakuratannya pada analisis sebelumnya.

Dari gambar tersebut, Mn pada wilayah penelitian masuk ke dalam kategori sangat rendah hingga sangat tinggi. Adanya Mn pada lokasi penelitian karena merupakan unsur alami dari aktivitas vulkanik, juga diindikasikan karena adanya input antropogenik yaitu aktivitas domestik

dan agrikultur. Hal ini diperkuat oleh penelitian Hou *et al.* (2020) bahwa adanya Mn di lingkungan akibat beberapa faktor, diantaranya adanya urbanisasi, agrikultur dan kegiatan domestik.



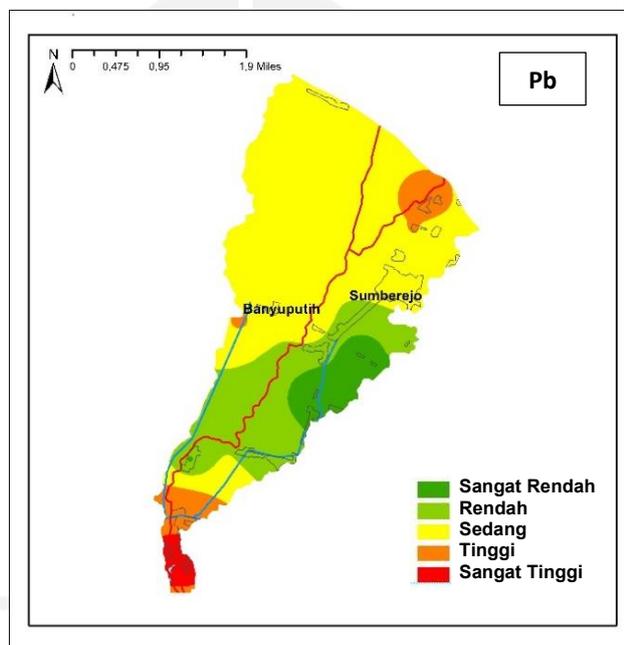
Gambar 15 Peta Zona Bahaya Logam Mn

Desa Sumberejo masuk ke dalam tiga kategori. Kategori sangat rendah dan rendah terdapat pada selatan Sumberejo, dan sedang berada pada Sumberejo bagian tengah, serta kategori tinggi – sangat tinggi berada pada Sumberejo bagian utara. Pada Desa Bantal masuk dalam kategori sangat rendah (0,0142-0,0177 mg/l). Desa Wringinanom masuk ke dalam kategori sangat tinggi (0,00736-0,2269 mg/l). Dari hasil kategori keempat desa tersebut didapat bahwa semakin ke utara konsentrasi Mn semakin tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa semakin dekat dengan jarak jaringan netral, konsentrasi logam akan semakin rendah. Sebab, jaringan netral yang berkorelasi dengan Mn akan berkontribusi dalam pengenceran atau dilusi logam Mn. Selain itu karena kondisi wilayah tidak asam atau tidak dipengaruhi oleh jaringan asam, maka logam Mn pada air tanah tidak tinggi.

D. Pb

Zonasi sebaran logam Pb pada daerah penelitian ditunjukkan pada **Gambar 16** logam Pb terdapat 5 zona yaitu sangat rendah hingga sangat tinggi.

Adapun konsentrasi zona sangat rendah Pb adalah berkisar 0,0485-0,0641 mg/l; pada zona rendah memiliki konsentrasi sebesar 0,0275-0,0365 mg/l; dan pada zona sangat tinggi nilai konsentrasi Pb adalah 0,0205-0,0275 mg/l.



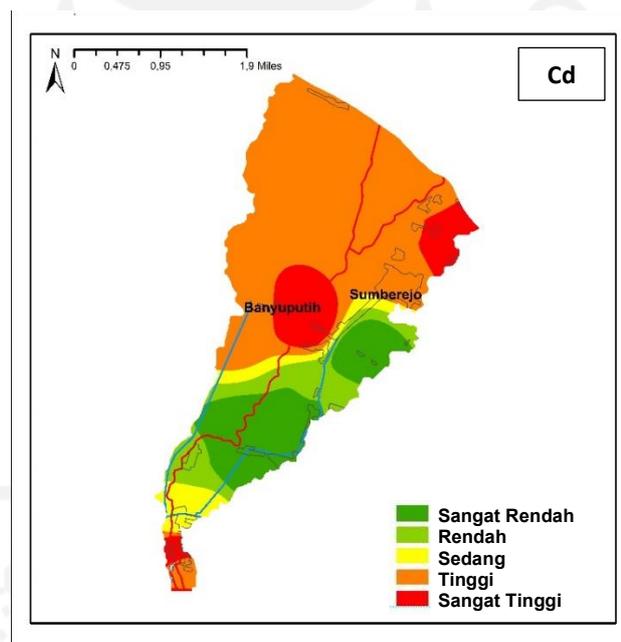
Gambar 16 Peta Zona Bahaya Logam Pb

Desa Bantal dan Sumberejo Utara masuk ke dalam kategori sangat tinggi dengan konsentrasi 0,0205–0,0275 mg/l. Hal ini karena kedua desa tersebut berlokasi sangat dekat dengan jaringan asam yang menjadi sumber pencemar Pb dan jaringan asam berkontribusi dalam dispersi Pb dalam air tanah, selain itu juga karena adanya akumulasi parameter tersebut pada bagian hilir jaringan asam. Kemudian Desa Sumberejo masuk ke dalam

empat kategori (sangat rendah – tinggi). Kategori tinggi hingga sangat rendah pada Desa Sumberejo terjadi karena lokasi sedikit jauh dengan jaringan asam, sehingga konsentrasi Pb tidak setinggi pada Sumberejo utara.

E. Cd

Gambar 17 menunjukkan peta zonasi logam Cd. Dari gambar tersebut, Cd pada wilayah penelitian masuk ke dalam kategori sangat rendah hingga sangat tinggi, sehingga terdapat 5 zona. Desa Banyuputih masuk ke dalam kategori sangat tinggi (0,0157-0,017 mg/l) dan juga tinggi (0,0142-0,0157 mg/l). Kategori sangat tinggi ini diindikasikan karena adanya aktivitas domestik dan agrikultur yang cukup tinggi pada Desa Banyuputih.



Gambar 17 Peta Zona Bahaya Logam Cd

Adapun desa Sumberejo masuk dalam kategori sangat rendah-sangat tinggi. Kategori sangat tinggi terletak di bagian selatan. Hal ini terjadi karena input antropogenik seperti di Desa Banyuputih yang turut menyumbang Cd dalam air tanah. Aktivitas manusia yang mempengaruhi

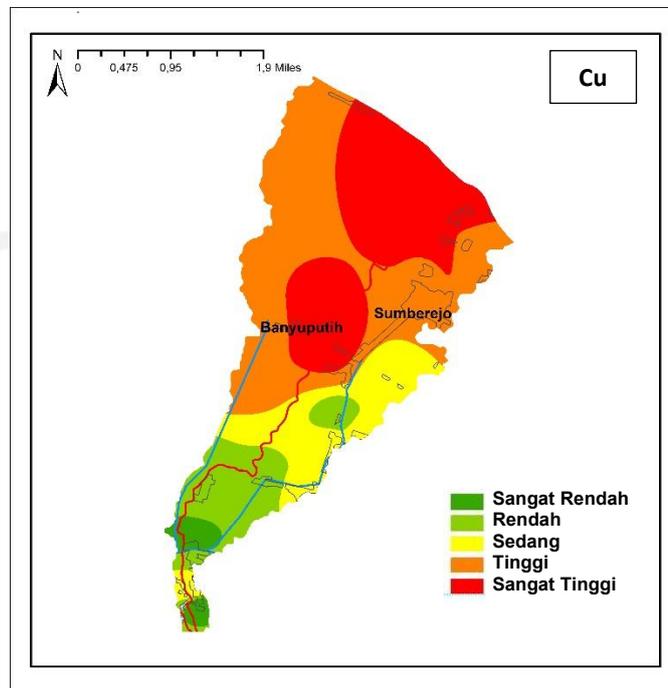
adanya Cd dalam air tanah salah satunya adalah aktivitas penggunaan pupuk (Smolders and Mertens, 2013).

Sedangkan kategori sangat rendah ini disebabkan oleh jaringan netral yang terdapat di wilayah tersebut dengan jarak yang sangat dekat, sehingga adanya pengenceran logam Cd. Mengenai Sumberejo dengan zona rendah (0,0108-0,0123 mg/l) dan sangat rendah (0,0095-0,0108 mg/l) karena wilayah ini terdapat jaringan netral yang berkontribusi dalam pengenceran dan kondisi tidak terlalu asam, sehingga mobilisasi Cd pada air tanah tidak tinggi. Sedangkan desa Sumberejo bagian utara dan wringinanom memiliki konsentrasi tinggi karena diindikasikan terdapat aktivitas domestik dan agrikultur yang turut memberikan input Cd dalam air tanah.

F. Cu

Zonasi sebaran logam Cu pada daerah penelitian ditunjukkan pada **Gambar 18** logam Cu terdapat 5 zona yaitu sangat rendah dengan konsentrasi 0,0028-0,0034 mg/l; rendah dengan konsentrasi 0,0034-0,0053 mg/l; sedang dengan konsentrasi 0,0053-0,0112 mg/l; tinggi dengan konsentrasi 0,0112-0,0292 mg/l; dan sangat tinggi dengan konsentrasi 0,0292-0,035 mg/l. Adanya Cu dalam lingkungan dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik, diantaranya pembakaran bahan bakar fosil dan limbah, domestik air limbah, penumpukan pembuangan sampah, produksi pupuk fosfat (Singh *et al.*, 2003).

Desa Sumberejo masuk ke dalam zona sangat rendah hingga tinggi. Sumberejo bagian utara dengan konsentrasi sangat tinggi diindikasikan karena adanya aktivitas antropogenik yaitu aktivitas domestik, dan pertanian yang turut menyumbang Cu dalam air tanah. Sumberejo dengan zona rendah dan sedang terindikasikan wilayah tersebut dilalui oleh jaringan netral yang turut berkontribusi dalam pengenceran Cu sebelum terinfiltrasi ke dalam akuifer dan mencapai permukiman Sumberejo. Adapun Sumberejo dengan zona tinggi ini disebabkan karena adanya input dari limbah domestik yang dihasilkan dari kegiatan MCK, serta agrikultur.



Gambar 18 Peta Zona Bahaya Logam Cu

Mengenai Desa Sumberejo yang masuk ke dalam zona sangat rendah dan rendah ini diindikasikan tidak adanya akumulasi logam dalam wilayah tersebut dan juga karena adanya kontribusi dari jaringan netral yang membantu dalam peristiwa dilusi Cu. Adapun Desa Banyuputih masuk dalam kategori zona dengan konsentrasi sangat tinggi. Hal ini diindikasikan adanya karena adanya input antropogenik dari aktivitas pertanian karena wilayah tersebut sangat tinggi agrikulturnya.

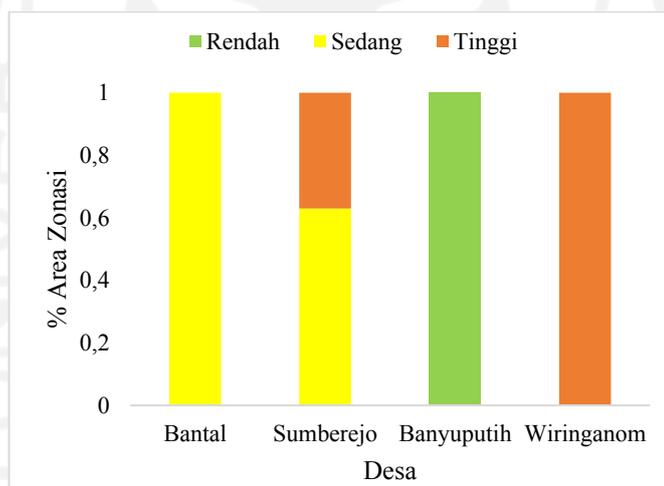
Desa bantal masuk ke dalam kategori sedang diindikasikan adanya input antropogenik yang turut menyumbang Cu. Desa Wringinanom masuk ke dalam kategori tinggi dan sangat tinggi diindikasikan karena terdapat input antropogenik dari limbah domestik yang dihasilkan dari aktivitas domestik dan juga agrikultur pada wilayah tersebut.

4.4.2. Analisis Luas Area Zona Bahaya dan Paparan Terhadap Jumlah Penduduk

Luas area zona bahaya dianalisis menggunakan 5 klasifikasi bahaya setiap parameternya dan paparan terhadap jumlah penduduk dianalisis berdasarkan kategori setiap desa.

A. Fe

Indeks bahaya Fe dihasilkan dengan zona rendah hingga tinggi (**Gambar 19**) serta paparan jumlah penduduk yang disajikan dalam **Tabel 13**. Adapun rentang konsentrasi rendah sebesar 0,0604-0,0882 mg/l; konsentrasi sedang adalah 0,0882-0,1534 mg/l; dan konsentrasi tinggi sebesar 0,1534-0,3067 mg/l.



Gambar 19 Persentase Area Zona Bahaya Fe

Tabel 13 Area Zona Bahaya dan Potensi Jumlah Penduduk Terpapar Fe

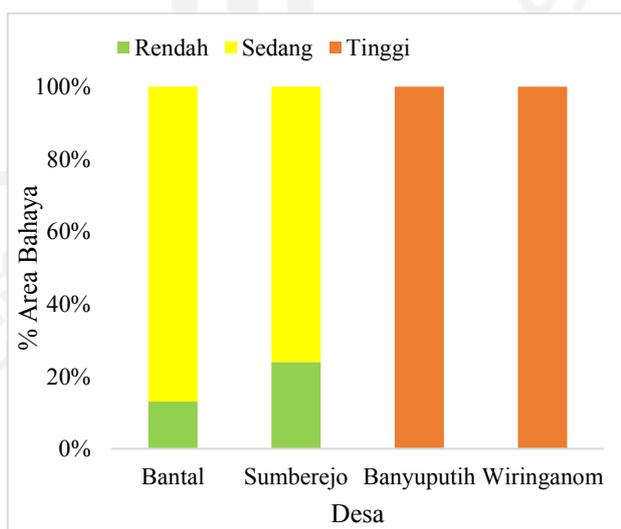
Fe			
Kategori	Desa	Area (m ²)	Jumlah Penduduk (Jiwa)
Rendah	Banyuputih	850143	28
Sedang	Bantal	730817	18
Sedang	Sumberejo	957795	131
Tinggi	Sumberejo	562515	77
Tinggi	Wringinanom	1056599	27

Hasil analisis mengungkapkan bahwa 37% area Sumberejo dan 100% area Wringinanom merupakan area bahaya Fe tinggi. Zona tinggi dengan luas 55784 m² dan 1056599 m² ini berpotensi memapar 77 jiwa penduduk di Desa Sumberejo dan 27 jiwa penduduk di Desa Wringinanom. Zona Fe dengan bahaya sedang dan bahaya rendah berlokasi di Desa Bantal, Banyuputih, Sumberejo, dan Wringinanom dengan masing-masing memiliki luas area sebesar 730817 m², 85014 m², 957795 m², 55784 m².

Pada semua desa (semua zona), konsentrasi Fe tidak melebihi baku mutu yang diizinkan Permenkes No. 492 Tahun 2010 (0,3 mg/l). Konsentrasi Fe dalam air minum harus di bawah 0,3 mg/l. Hal ini karena telah diketahui bahwa bahkan ketika kandungan polutan tanah dan makanan lebih rendah dari tingkat kritisnya, tetapi efeknya dalam tubuh manusia dapat mengancam kesehatan manusia (Zhuang *et al.*, 2013).

B. Zn

Indeks bahaya Zn dihasilkan dengan zona rendah hingga tinggi (**Gambar 20**) serta paparan jumlah penduduk yang disajikan dalam **Tabel 14**.



Gambar 20 Persentase Area Zona Bahaya Zn

Tabel 14 Area Zona Bahaya dan Potensi Jumlah Penduduk Terpapar Zn

Zn			
Kategori	Desa	Area (m ²)	Jumlah Penduduk (Jiwa)
Rendah	Bantal	95006	24
Rendah	Sumberejo	364874	497
Sedang	Sumberejo	1155436	1575
Sedang	Bantal	635810	158
Tinggi	Banyuputih	850143	279
Tinggi	Wringinanom	1056599	268

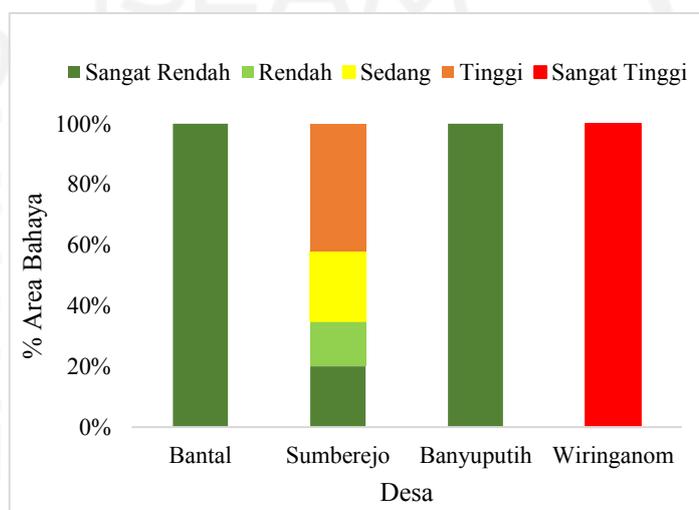
Adapun rentang konsentrasi rendah sebesar 0,0906-0,1181 mg/l; konsentrasi sedang adalah 0,1181-0,1496 mg/l; dan konsentrasi tinggi sebesar 0,1496-0,1857 mg/l. Konsentrasi Zn yang berlebih dapat mengganggu kesehatan manusia seperti muntah-muntah hingga gagal ginjal (Rajni and Kesnav, 2010).

Hasil analisis menunjukkan bahwa konsentrasi tinggi Zn berada di desa Banyuputih dan Wringinanom dengan presentasi area 100%. Mengenai jumlah penduduk yang terpapar bahaya tinggi berjumlah 279 jiwa pada Desa Banyuputih dan 268 jiwa pada Desa Wringinanom. Adapun area Zn bahaya rendah (0,0906-0,1181 mg/l) dan sedang (0,1181-0,1496 mg/l) berada di lokasi Bantal dengan persentase luas 13% (rendah) dan 87% (tinggi), serta Sumberejo dengan persentase luas area sebesar 24% (rendah) dan 76% (tinggi).

Semua desa memiliki konsentrasi Zn di bawah baku mutu Permenkes No. 492 Tahun 2010, karena syarat air minum harus di bawah 3 mg/l. Namun, hal ini tetap harus diwaspadai, karena bahkan ketika kandungan polutan tanah dan makanan lebih rendah dari tingkat kritisnya, tetapi efeknya dalam tubuh manusia dapat mengancam kesehatan manusia (Zhuang *et al.*, 2013).

C. Mn

Indeks bahaya Mn dihasilkan dengan zona rendah hingga sangat tinggi (**Gambar 21**) serta paparan jumlah penduduk yang disajikan dalam **Tabel 15**. Hasil analisis menunjukkan zona bahaya sangat tinggi Mn berada di Desa Wringinanom dengan persentase luas area 100%. Zona sangat tinggi ini memiliki rentang konsentrasi dari 0,00736-0,2269 mg/l dengan paparan jumlah penduduk 268 jiwa.



Gambar 21 Persentase Area Zona Bahaya Mn

Tabel 15 Area Zona Bahaya dan Potensi Jumlah Penduduk Terpapar Mn

Kategori	Desa	Area (m ²)	Jumlah Penduduk (Jiwa)
Sangat Rendah	Sumberejo	304062	415
Sangat Rendah	Banyuputih	850143	279
Sangat Rendah	Bantal	730817	182
Rendah	Sumberejo	228047	311
Sedang	Sumberejo	349671	477
Tinggi	Sumberejo	638530	871
Sangat Tinggi	Wringinanom	1056599	268

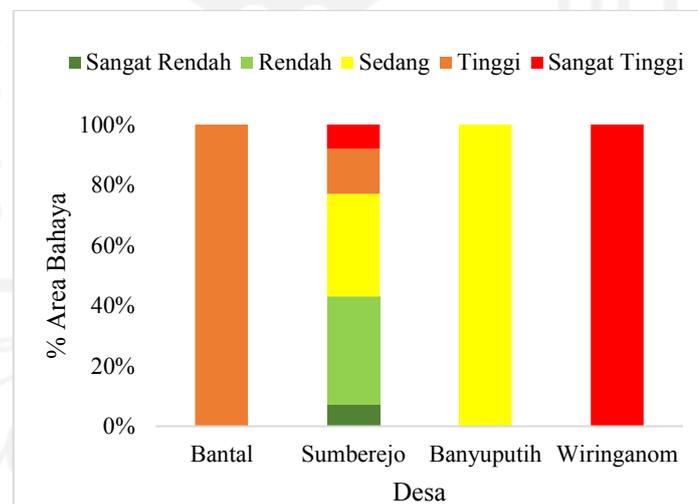
Adapun zona sedang (0,0177-0,03 mg/l) dan tinggi (0,03-0,0736 mg/l) berada di Desa Sumberejo dengan persentase area sebesar 23% dan

42%, serta jumlah penduduk yang berpotensi terpapar sebanyak 477 dan 871 jiwa. Zona rendah (0,0142-0,0177 mg/l) dan sangat rendah (0,0018-0,142 mg/l) berada di Desa Sumberejo, Bantal, serta Banyuputih.

Dari hasil analisis menunjukkan bahwa konsentrasi Mn pada semua desa di bawah ketentuan baku mutu pada Permenkes No. 492 Tahun 2010 (2 mg/l). Namun, hal ini juga tetap harus diwaspadai, karena bahkan ketika kandungan polutan tanah dan makanan lebih rendah dari tingkat kritisnya, tetapi efeknya dalam tubuh manusia dapat mengancam kesehatan manusia (Zhuang *et al.*, 2013).

D. Pb

Indeks bahaya Mn dihasilkan dengan zona rendah hingga sangat tinggi (0,0205 – 0,0275; 0,0275-0,0365; 0,0365-0,0641; 0,0485-0,0641; 0,06041-0,085) (**Gambar 22**) serta paparan jumlah penduduk yang disajikan dalam **Tabel 16**.



Gambar 22 Persentase Area Zona Bahaya Pb

Hasil analisis menunjukkan bahwa zona Pb sangat tinggi dan tinggi berada di Desa Banyuputih dan Desa Wringinanom dengan luas area masing-masing sebesar 100%. Potensi penduduk yang terpapar oleh

konsentrasi sangat tinggi di Sumberejo berjumlah 166 jiwa, dan di Wringinanom berjumlah 268 jiwa. Area bahaya sedang (0,0365-0,04845 mg/l) berada di Banyuputih dengan persentase luas area 100% dan Sumberejo dengan luas area 34%. Adapun jumlah penduduk yang berpotensi terpapar Pb dengan konsentrasi sedang berjumlah 705 jiwa di Sumberejo, dan 279 jiwa di Banyuputih.

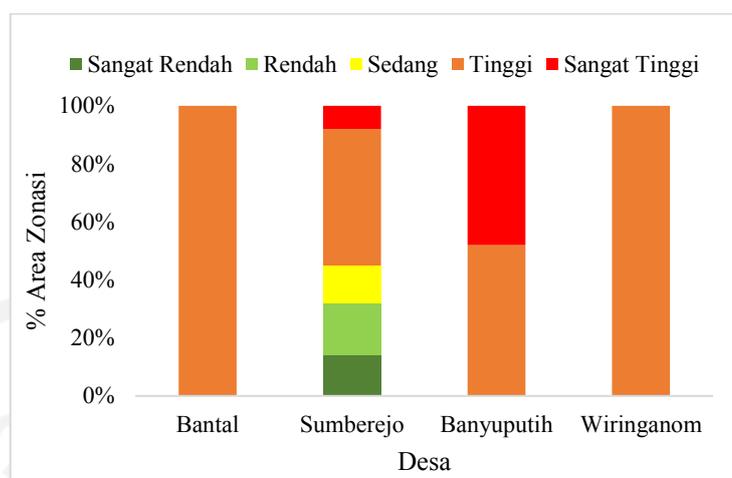
Tabel 16 Area Zona Bahaya dan Potensi Jumlah Penduduk Terpapar Pb

Pb			
Kategori	Desa	Area (m ²)	Jumlah Penduduk (Jiwa)
Sangat Rendah	Sumberejo	106422	145
Rendah	Sumberejo	547312	746
Sedang	Sumberejo	516906	705
Sedang	Banyuputih	850143	279
Tinggi	Sumberejo	228047	311
Tinggi	Bantal	730817	182
Sangat Tinggi	Sumberejo	121625	166
Sangat Tinggi	Wringinanom	1056599	268

Analisis lebih lanjut dihasilkan bahwa semua desa memiliki konsentrasi di atas 0,01 mg/l, dimana angka ini merupakan baku mutu Pb yang ditetapkan oleh Permenkes No. 492 Tahun 2010. Hal ini menjadi masalah serius karena asupan Pb yang tinggi dapat merusak sistem saraf, rangka, peredaran darah, enzim, endokrin, dan kekebalan orang yang terpapar logam ini (Mitra *et al.*, 2017).

E. Cd

Indeks bahaya Cd dihasilkan dengan zona rendah hingga tinggi (**Gambar 23**) serta paparan jumlah penduduk yang disajikan dalam **Tabel 17**.



Gambar 23 Persentase Area Zona Bahaya Cd

Tabel 17 Area Zona Bahaya dan Potensi Jumlah Penduduk Terpapar Cd

Cd			
Kategori	Desa	Area (m ²)	Jumlah Penduduk (Jiwa)
Sangat Rendah	Sumberejo	212843	290
Rendah	Sumberejo	273656	373
Sedang	Sumberejo	197640	269
Tinggi	Sumberejo	714546	974
Tinggi	Bantal	730817	182
Tinggi	Wringinanom	1056599	268
Tinggi	Banyuputih	442075	145
Sangat Tinggi	Sumberejo	121625	166
Sangat Tinggi	Banyuputih	408069	134

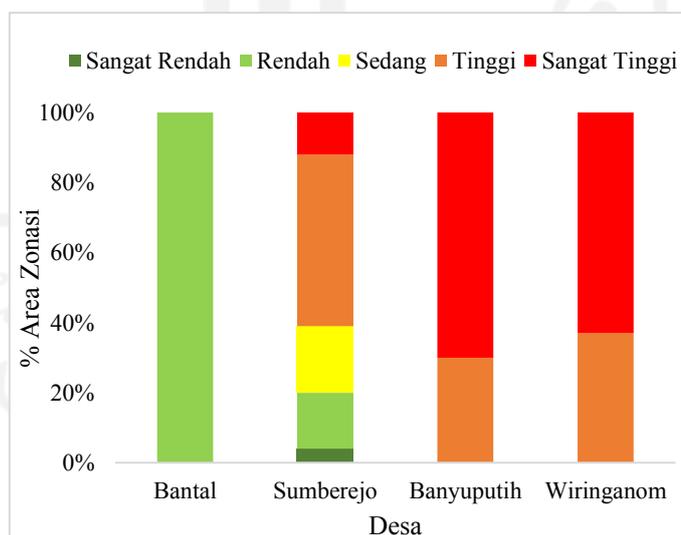
Hasil analisis menunjukkan bahwa zona 48% Banyuputih, dan 8% Sumberejo merupakan zona bahaya Cd kategori sangat tinggi (0,0157-0,017 mg/l). Adapun jumlah penduduk yang terpapar di masing-masing desa berjumlah 166 dan 134 jiwa. Selain itu 100% Wringinanom, 100% Bantal, 47% Sumberejo, 52% Banyuputih masuk ke dalam zona bahaya Cd tinggi dengan jumlah penduduk yang berpotensi terpapar berjumlah 268, 182, 974, 145 jiwa.

Zona Cd sangat rendah (0,0095-0,0108 mg/l) dan rendah (0,0108-0,0123 mg/l) hanya berada di Desa Sumberejo dengan persentase area 14%, dan 18% dengan potensi jumlah penduduk yang terpapar sejumlah 290 jiwa dan 373 jiwa. Adapun zona Cd dengan kategori sedang (0,0123-0,0142 mg/l) hingga tinggi (0,0142-0,0157 mg/l) berada di Sumberejo, Bantal, Wringinanom, dan Banyuputih.

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa semua desa melebihi 0,003 mg/l. Dimana angka ini merupakan baku mutu yang telah ditetapkan oleh Permenkes No. 492 Tahun 2010. Sehingga seluruh desa ini tidak memenuhi persyaratan kualitas air minum. Kelebihan asupan Cd akan menyebabkan toksisitas dan toksisitas kadmium pada manusia dapat menyebabkan kanker paru-paru, masalah tulang, gangguan ginjal, prostat penyakit, efek hematologis dan imunologis (Nordberg *et al.*, 2018).

F. Cu

Indeks bahaya Mn dihasilkan dengan zona rendah hingga sangat tinggi (**Gambar 24**) serta paparan jumlah penduduk yang disajikan dalam **Tabel 18**.



Gambar 24 Persentase Area Zona Bahaya Cu

Tabel 18 Area Zona Bahaya dan Potensi Jumlah Penduduk Terpapar Cu

Cu			
Kategori	Desa	Area (m ²)	Jumlah Penduduk (Jiwa)
Sangat Rendah	Sumberejo	60812	83
Rendah	Sumberejo	243250	332
Rendah	Bantal	730817	182
Sedang	Sumberejo	288859	394
Tinggi	Sumberejo	744952	1016
Tinggi	Banyuputih	255043	84
Tinggi	Wringinanom	390942	99
Sangat Tinggi	Sumberejo	182437	249
Sangat Tinggi	Banyuputih	595100	195
Sangat Tinggi	Wringinanom	665658	169

Analisis menunjukkan bahwa 70% Desa Banyuputih, 63% Desa Wringinanom, dan 12% Desa Sumberejo merupakan zona dengan bahaya Cu sangat tinggi (0,0292-0,035 mg/l). Potensi jumlah penduduk yang terpapar konsentrasi Cu sangat tinggi berjumlah 195, 169, dan 249 jiwa. Adapun zona sedang berlokasi di Sumberejo dengan luas area 19% dan jumlah penduduk yang berpotensi terpapar 394 jiwa. Zona tinggi Cu berada di lokasi 49% Sumberejo, 30% Banyuputih, dan 37% Wringinanom dengan jumlah penduduk yang memiliki potensi terpapar secara berurutan adalah 1016 jiwa, 84 jiwa, dan 99 jiwa. Sedangkan zona sedang berada di Sumberejo dengan luas 19% dan potensi penduduk yang terpapar berjumlah 394 jiwa. Adapun kategori sangat rendah berada di 4% Sumberejo dengan jumlah penduduk yang berpotensi terpapar adalah 83 jiwa. Sedangkan kategori rendah berada di 100% Bantal dan 16% Sumberejo dengan jumlah penduduk secara berurutan adalah 332 jiwa dan 182 jiwa.

Analisis lebih lanjut menunjukkan bahwa semua desa (semua zona) tidak melebihi 2 mg/l. Dimana nilai tersebut merupakan baku mutu yang telah ditetapkan Permenkes No. 492 Tahun 2010. Namun, apabila asupan Cu yang masuk ke dalam tubuh terus menerus dan menyebabkan akumulasi

maka akan menyebabkan kelebihan asupan yang akan menimbulkan stress oksidatif, hingga dapat merusak DNA (Manne *et al.*, 2022).

4.5. Potensi Risiko Paparan dan Efek Kronik Pada Konsentrasi Distribusi Spasial

Hasil rata-rata konsentrasi logam tiap kategori (**Tabel 19**) dianalisis lebih lanjut untuk mengetahui potensi risiko paparan melalui oral dan efek kroniknya pada setiap zona. Analisis risiko dan paparan logam akibat konsumsi air minum dilakukan berdasarkan metodologi USEPA. Tingkat toksisitas logam terhadap kesehatan manusia secara langsung berhubungan dengan asupan air minum sehari-hari.

Untuk memperkirakan dosis paparan manusia melalui oral (air minum) terhadap logam dibutuhkan nilai dosis paparan harian rata-rata melalui oral (air minum) (I). Adapun persamaan yang digunakan diadaptasi dari USEPA (**Persamaan 12**) (USEPA, 2011).

$$I_{nk} = \frac{C \times IR \times EF \times ED}{BW \times AT} \dots\dots\dots (12)$$

Tabel 19 Rata-rata Konsentrasi Logam Tiap Zona

Parameter	Sangat Rendah	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat Tinggi
Fe (mg/l)	0,0545	0,0743	0,1208	0,2301	0,4868
Zn (mg/l)	0,0786	0,1044	0,1339	0,1677	0,2063
Mn (mg/l)	0,0719	0,0160	0,0239	0,0518	0,1171
Pb (mg/l)	0,0240	0,0320	0,0425	0,0563	0,0727
Cd (mg/l)	0,0102	0,0116	0,0133	0,0150	0,0327
Cu (mg/l)	0,0062	0,0044	0,0165	0,0404	0,0642

Parameter-parameter yang digunakan dalam mengevaluasi nilai I_{nk} melalui oral dengan risiko non karsinogenik dan akrsinogenik disajikan pada **Tabel 20**, asumsi-asumsi data yang digunakan bersumber dari USEPA 2011.

Tabel 20 Parameter Model Penilaian Risiko Kesehatan Air Tanah

Parameter	Keterangan	Satuan	Dewasa	Anak
I	Asupan harian melalui air minum	mg/kg.d	-	-
C	Konsentrasi	mg/l	-	-
IR	Laju konsumsi	L/hari	2	1
AT*	Periode waktu rata-rata	Hari	(ED x 365)	(ED x 365)
AT**	Periode waktu rata-rata	Hari	(70 x 365)	(70 x 365)
EF	Frekuensi paparan	Hari/tahun	350	350
ED	Durasi paparan	Tahun	30	6
BW	Berat badan	Kg	55	15

* Non karsinogenik

** Karsinogenik

Sumber: USEPA, 2011

4.5.1. Risiko Non-karsinogenik

Untuk memperkirakan risiko non karsinogenik digunakan karakteristik risiko non karsinogenik (RQ) yang dikalkulasi menggunakan **Persamaan 13** dan *hazard indeks* (HI) yang dikalkulasi menggunakan **Persamaan 14** (USEPA, 2004). HI digunakan untuk mengukur total risiko non karsinogenik dari semua elemen logam (USEPA, 2004).

$$RQ = \frac{I_{nk}}{RfD} \dots\dots\dots (13)$$

$$HI = \sum RQ \dots\dots\dots (14)$$

RfD mengacu pada dosis referensi oral (mg/kg/hari) yang mengacu pada literatur USEPA. Adapun nilai RfD disajikan dalam **Tabel 21**.

Tabel 21 Nilai Rfd Setiap Parameter

Parameter	Rfd (mg/kg/hari)
Pb	0,00049
Fe	0,006
Cd	0,0005
Cu	0,04
Zn	0,3
Mn	0,14

Sumber: USEPA IRIS, 2011

Ringkasan hasil nilai intake oral (I_{oral}), RQ, dan HI untuk semua logam dalam air minum melalui ingesti disajikan pada **Tabel 22** dan **Tabel 23**. Seperti yang terlihat dari data, nilai RQ pada logam Zn, Mn, dan Cu tidak melebihi ambang batas ($RQ < 1$) pada semua kategori untuk orang dewasa maupun anak-anak. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat asupan harian keempat logam tersebut **aman**, sehingga **tidak berisiko** untuk frekuensi pajanan 350 hari/tahun hingga 70 tahun pada orang dewasa dan **aman** serta **tidak berisiko** untuk frekuensi pajanan 350 hari/tahun hingga 6 tahun pada anak-anak. Tetapi, walaupun menunjukkan nilai $RQ < 1$ pada semua zona, namun hal ini tetap dapat mengancam manusia apabila terakumulasi dalam tubuh.

Tabel 22 Hasil Analisis Intake Oral Efek Non Karsinogenik

Kategori	Usia	Intake Pemajanan (I_{oral})					
		Fe	Zn	Mn	Pb	Cd	Cu
Sangat Rendah	Anak	0,00348	0,00050	0,00460	0,00153	0,00065	0,00040
	Dewasa	0,00190	0,00274	0,00251	0,00084	0,00035	0,00022
Rendah	Anak	0,00475	0,00667	0,00102	0,00205	0,00074	0,00028
	Dewasa	0,00259	0,00364	0,00056	0,00112	0,00040	0,00015
Sedang	Anak	0,00772	0,00856	0,00152	0,00272	0,00085	0,00105
	Dewasa	0,00421	0,00467	0,00083	0,00148	0,00046	0,00058
Tinggi	Anak	0,01471	0,01072	0,00331	0,00360	0,00096	0,00258
	Dewasa	0,00802	0,00585	0,00181	0,00196	0,00052	0,00141
Sangat Tinggi	Anak	0,03112	0,01319	0,00749	0,00465	0,00209	0,00410
	Dewasa	0,01697	0,00719	0,00408	0,00254	0,00114	0,00224

Tabel 23 Hasil Nilai Karakterisasi Risiko (RQ) dan *Hazard Index* (HI) Efek Non Karsinogenik

Kategori	Usia	Karakterisasi Risiko (RQ)						HI_{oral}
		Fe	Zn	Mn	Pb	Cd	Cu	
Sangat Rendah	Anak	0,581	0,017	0,033	3,131	1,298	0,000	5,123
	Dewasa	0,317	0,009	0,018	1,708	0,708	0,000	2,795
Rendah	Anak	0,792	0,022	0,007	4,175	1,477	0,000	6,473
	Dewasa	0,432	0,012	0,004	2,277	0,805	0,000	3,531
Sedang	Anak	1,287	0,029	0,011	5,541	1,694	0,001	8,563
	Dewasa	0,702	0,016	0,006	3,023	0,924	0,001	4,671
Tinggi	Anak	2,451	0,036	0,024	7,345	1,911	0,003	11,805
	Dewasa	1,337	0,019	0,013	4,006	1,043	0,001	6,439
Sangat Tinggi	Anak	5,187	0,044	0,053	9,485	4,181	0,004	18,954
	Dewasa	2,829	0,024	0,029	5,174	2,280	0,002	10,339

Adapun pada logam Fe, nilai RQ $RQ > 1$ pada zona sedang untuk anak bernilai 1,287, kategori zona tinggi untuk anak dan dewasa adalah 2,451 dan 1337, serta zona sangat tinggi untuk anak dan dewasa sebesar 5,187 dan 2,829. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat asupan harian pada zona-zona tersebut **tidak aman** untuk frekuensi pajanan 350 hari/tahun hingga 30 tahun pada orang dewasa dan **aman dan berisiko non karsinogenik** untuk frekuensi pajanan 350 hari/tahun dalam jangka waktu 6 tahun pada anak-anak.

Hal yang sama dialami pada zona bahaya Cd. Analisis menunjukkan bahwa zona Cd menghasilkan nilai RQ $RQ > 1$ pada zona dengan kategori sangat rendah untuk anak (1,298), zona rendah untuk anak (1,477), zona sedang untuk anak (1,694), zona tinggi untuk anak (1,911) dan dewasa (1,043), dan zona sangat tinggi untuk anak (4,181) dan dewasa (2,280). Sehingga dapat dikatakan bahwa tingkat asupan harian pada zona-zona tersebut **tidak aman dan berisiko non karsinogenik** untuk frekuensi pajanan 350 hari/tahun hingga 30 tahun pada orang dewasa dan untuk frekuensi pajanan 350 hari/tahun dalam jangka waktu 6 tahun pada anak-anak.

Pada elemen bahaya zona Pb juga mengalami hal yang sama, yaitu menunjukkan bahwa semua zona Pb dari kategori sangat rendah hingga tinggi untuk usia anak dan dewasa bernilai RQ $RQ > 1$, hal ini menunjukkan bahwa tingkat asupan harian pada semua zona Pb tidak aman dan berisiko non karsinogenik untuk frekuensi pajanan 350 hari/tahun hingga 30 tahun pada orang dewasa dan dan untuk frekuensi pajanan 350 hari/tahun dalam jangka waktu 6 tahun pada anak-anak. Dari analisis risiko di atas menunjukkan bahwa Desa Sumberejo, Bantal, Banyuputih serta Wringinanom merupakan area dengan tingkat asupan harian **tidak aman dan berisiko non karsinogenik** dari logam Fe, Pb, dan Cd.

Selanjutnya, hasil analisis HI melalui oral (air minum) menunjukkan bahwa HI_{oral} untuk anak dan dewasa pada semua zona bernilai HI $HI > 1$, hal ini menunjukkan bahwa pada semua zona untuk anak dan dewasa mengindikasikan adanya potensi risiko non karsinogenik.

4.5.2. Risiko Karsinogenik

Risiko karsinogenik mengacu pada risiko dimana seseorang dapat berpotensi kanker selama hidupnya ketika terkena polutan yang berpotensi karsinogenik. Untuk menentukan tingkat risiko dibutuhkan nilai ECR (ekses risiko kanker). Adapun (ECR) dihitung menggunakan **Persamaan 15**.

$$ECR = I \times SF \dots\dots\dots (15)$$

Pada perhitungan risiko karsinogenik, diperlukan nilai SF (*Slope Factor*). Pada enam parameter ini, SF oral hanya tersedia untuk parameter Pb dan Cd, karena keduanya dianggap sebagai kontaminan karsinogenik oleh *the International Agency for Research on Cancer* (IARC, 2011). SF digunakan untuk mengestimasi risiko kanker dengan paparan zat karsinogenik. SF ini mengacu pada USEPA 2011, **Tabel 24** adalah nilai SF pada setiap parameternya.

Tabel 24 Nilai SF pada Setiap Parameter

Parameter	SF _{ing} (mg/kg.hari)
Fe	-
Zn	-
Mn	-
Pb	0,0085
Cd	0,38
Cu	-

Sumber: USEPA, 2011

Hasil dari intake oral dan ECR dari Pb disajikan dalam **Tabel 25**. Hasil ECR dikatakan aman apabila $ECR \leq E-4$ (10^{-4}) (Kemenkes, 2012). Dari hasil perhitungan risiko karsinogenik, menunjukkan bahwa untuk pajanan (oral) Pb pada konsentrasi semua kategori untuk usia dewasa dan anak dengan berat badan rata-rata 55 kg dan 15 kg dan telah terpajan selama 350 hari/tahun serta selama 30 tahun (dewasa) dan 6 tahun (anak-anak) diketahui **aman** dan **tidak berisiko karsinogenik**. Namun, hasil menunjukkan pajanan (oral) Cd pada konsentrasi

kategori sangat tinggi untuk usia dewasa dengan berat badan rata-rata 55 kg dan telah terpajan selama 350 hari/tahun serta selama 30 tahun diketahui **tidak aman dan berisiko karsinogenik**.

Tabel 25 Hasil Intake Oral (I) dan Ekses Risiko Karsinogenik (ECR) Pb dan Cd

Kategori Zona	Usia	I _{oral}		ERC	
		Pb	Cd	Pb	Cd
Sangat Rendah	Anak	0,00013	0,00002	1,11781E-06	2,1134,E-05
	Dewasa	0,00036	0,00006	3,04857E-06	5,7639,E-05
Rendah	Anak	0,00018	0,00002	1,49041E-06	2,4049,E-05
	Dewasa	0,00048	0,00007	4,06476E-06	6,5589,E-05
Sedang	Anak	0,00023	0,00003	1,97829E-06	2,7589,E-05
	Dewasa	0,00063	0,00008	5,39533E-06	7,5243,E-05
Tinggi	Anak	0,00031	0,00003	2,62219E-06	3,1129,E-05
	Dewasa	0,00084	0,00008	7,15143E-06	8,4897,E-05
Sangat Tinggi	Anak	0,00040	0,00007	3,38626E-06	6,8088,E-05
	Dewasa	0,00109	0,00019	9,23526E-06	1,8569,E-04

4.5.3. Efek Paparan

Hasil analisis risiko karsinogenik menunjukkan elemen Fe, Pb dan Cd tidak aman dan berisiko non karsinogenik untuk pajanan oral (air minum). Elemen Fe merupakan elemen esensial atau elemen penting yang dibutuhkan oleh tubuh (Foster et al., 2006). Menurut Wada (2013), meskipun elemen esensial ini hanya 0,02% dari total berat badan, namun unsur-unsur tersebut memainkan peran penting dalam tubuh. Apabila kekurangan atau kelebihan unsur-unsur tersebut dapat mengakibatkan kegagalan fungsi tubuh yang parah dan bahkan menyebabkan kematian, karena unsur-unsur ini secara langsung mempengaruhi proses metabolisme dan fisiologis organisme (Bhattacharya *et al.*, 2005). Namun, kelebihan zat esensial dapat mengganggu kesehatan tubuh manusia (Lonnerdal, 2017).

Asupan Fe yang dianjurkan dalam makanan adalah sekitar 16 hingga 18 mg/hari untuk pria dan 12 mg/hari untuk wanita. *Tolerable Upper Intake Level* (UL) atau batas asupan untuk orang dewasa adalah 45 mg/hari, tingkat yang didasarkan pada gangguan gastrointestinal sebagai efek samping (NAP, 2002). Kekurangan Fe dapat menyebabkan diare kronis yang parah. Namun, kelebihan zat Fe dapat

mengganggu kesehatan tubuh manusia seperti penurunan pertumbuhan (baik pertumbuhan tinggi dan berat badan), penyakit kardiovaskular (Lønnerdal, 2017).

Menurut WHO (1996), Pb merupakan elemen yang berpotensi beracun. Terdapat indikasi sangat kuat bahwa studi pada anak kecil (10-12) dengan riwayat paparan yang cukup stabil menunjukkan bahwa mereka menyerap dan mempertahankan timbal yang tertelan jauh lebih banyak daripada orang dewasa, yaitu 40-50% dibanding dengan 10-50%. Efek buruk Pb pada kesehatan yaitu pada sistem saraf pusat, yaitu terjadi pada tingkat darah yang bayi dan anak-anak dibandingkan pada orang dewasa. Selain itu efek Pb adalah pada neurologis, neurobehavioural, efek perkembangan pada anak-anak, efek ginjal, dan efek pada tekanan darah. Adapun asupan maksimum yang dapat ditoleransi menurut komite ahli gabungan FAO/WHO tidak melebihi 25 $\mu\text{g}/\text{kg}$ berat badan per minggu untuk orang dewasa, anak, dan bayi. Dengan demikian rata-rata asupan orang dewasa berada pada sekitar 20-514 $\mu\text{g}/\text{hari}$.

Menurut WHO (1973), Cd merupakan elemen yang masuk ke dalam klasifikasi elemen yang berpotensi beracun. Menurut WHO (1996), penyerapan kadmium paling tinggi terjadi pada anak-anak dibanding dengan remaja atau orang dewasa. Komite ahli gabungan FAO/WHO merekomendasikan bahwa 7 μg kadmium/kg berat badan sebagai asupan kadmium mingguan maksimum yang dapat ditoleransi. WHO juga menetapkan nilai pedoman tertinggi untuk kadmium dalam air minum adalah 3 $\mu\text{g}/\text{l}$. Konsumsi kadmium berlebih akan menimbulkan risiko kesehatan dan konsentrasi kadmium tertinggi ditemukan di ginjal dimana kadmium terakumulasi seiring bertambahnya usia. Konsumsi kadmium berlebih akan menyebabkan beberapa risiko seperti kerusakan ginjal, gangguan pada pertumbuhan tulang, hingga kerusakan paru-paru.

4.5.4. Strategi Pengelolaan Risiko Non Karsinogenik

Dari hasil analisis risiko karsinogenik tersebut dilakukan analisis lebih lanjut untuk mengetahui strategi pengelolaan risiko, karena RQ pada beberapa zona menunjukkan tidak aman dan berisiko non karsinogenik yang ditimbulkan dari paparan Fe, Pb dan Cd melalui oral (air minum). Strategi pengelolan risiko

dilakukan dengan menentukan konsentrasi aman (C_{nk}) yang dikonsumsi oleh masyarakat yang dinyatakan dalam l/hari dengan menggunakan **Persamaan 16**, serta penentuan jumlah konsentrasi konsumsi aman (R_{nk}) yang dinyatakan dalam mg/l dengan menggunakan **Persamaan 17**.

$$C_{nk} = \frac{RfD \times BW \times AT}{IR \times EF \times ED} \dots\dots\dots (16)$$

$$R_{nk} = \frac{RfD \times BW \times AT}{C_{nk} \times EF \times ED} \dots\dots\dots (17)$$

Hasil dari perhitungan strategi pengelolaan risiko disajikan dalam **Tabel 26**. Untuk logam Fe dianjurkan mengonsumsi air minum dengan konsentrasi 0,094 mg/l pada anak, dan 0,172 mg/l pada orang dewasa. Adapun jumlah konsumsi aman pada zona sedang pada anak adalah 0,777 l/hari, zona tinggi pada anak dan dewasa sebesar 0,408 l/hari dan 1,496 l/hari, serta pada zona sangat tinggi untuk anak dan dewasa sebesar 0,193 l/hari dan 0,707 l/hari.

Pada logam Pb konsentrasi aman yang dianjurkan pada anak 0,008 mg/l, dan pada orang dewasa 0,014 mg/l. Adapun jumlah konsumsi air minum untuk anak pada zona sangat rendah hingga tinggi berturut-turut adalah 0,319 l/hari; 0,24 l/hari; 0,18 l/hari; 0,136 l/hari; 0,15 l/hari. Sedangkan untuk orang dewasa dari kategori sangat rendah hingga sangat tinggi secara berurutan adalah 1,171 l/hari; 0,878 l/hari; 0,662 l/hari; 0,499 l/hari; 0,387 l/hari.

Pada logam Cd konsentrasi aman yang dianjurkan pada anak 0,008 mg/l, dan pada orang dewasa 0,014 mg/l. Adapun jumlah konsumsi air minum pada zona sangat rendah untuk anak sebesar 0,77 l/hari, pada zona rendah untuk anak 0,677 l/hari, pada zona sedang untuk anak 0,59 liter/hari, pada zona tinggi untuk anak dan dewasa sebesar 0,523 l/hari dan 1,918 l/hari, serta pada zona sangat tinggi untuk anak dan dewasa sebesar 0,239 l/hari dan 0,877 l/hari. Sebagai solusi dalam mencukupi kebutuhan air, masyarakat dianjurkan untuk meminum air dari sumber lain seperti air minum kemasan atau galon isi ulang.

Tabel 26 Strategi Pengelolaan Risiko Non Karsinogenik Melalui Oral

Kategori	Usia	Konsentrasi aman (mg/l)	Jumlah konsumsi aman (l/hari)
Fe			
Sedang	Anak	0,094	0,777
Tinggi	Anak	0,094	0,408
	Dewasa	0,172	1,496
Sangat Tinggi	Anak	0,094	0,193
	Dewasa	0,172	0,707
Pb			
Sangat Rendah	Anak	0,008	0,319
	Dewasa	0,014	1,171
Rendah	Anak	0,008	0,240
	Dewasa	0,014	0,878
Sedang	Anak	0,008	0,180
	Dewasa	0,014	0,662
Tinggi	Anak	0,008	0,136
	Dewasa	0,014	0,499
Sangat Tinggi	Anak	0,008	0,105
	Dewasa	0,014	0,387
Cd			
Sangat Rendah	Anak	0,008	0,771
Rendah	Anak	0,008	0,677
Sedang	Anak	0,008	0,590
Tinggi	Anak	0,008	0,523
	Dewasa	0,014	1,918
Sangat Tinggi	Anak	0,008	0,239
	Dewasa	0,014	0,877

4.5.4. Strategi Pengelolaan Risiko Karsinogenik

Dari hasil analisis risiko karsinogenik melalui oral menunjukkan ECR yang tidak aman pada parameter Cd, sehingga dilakukan analisis lebih lanjut untuk mengetahui strategi pengelolaan risiko karsinogenik melalui jumlah konsentrasi aman (C_{nk}) yang dikonsumsi oleh masyarakat yang dinyatakan dalam l/hari dengan

menggunakan **Persamaan 17**, serta penentuan jumlah konsentrasi konsumsi aman (R_{nk}) yang dinyatakan dalam mg/l dengan menggunakan **Persamaan 18**.

$$C_{nk} = \frac{\left(\frac{0,0001}{SF}\right) \times BW \times AT}{IR \times EF \times ED} \dots\dots\dots (17)$$

$$R_{nk} = \frac{\left(\frac{0,00001}{SF}\right) \times BW \times AT}{C_{nk} \times EF \times ED} \dots\dots\dots (18)$$

Hasil dari perhitungan strategi pengelolaan risiko disajikan dalam **Tabel 27**. Untuk logam Cd dianjurkan mengonsumsi air minum dengan konsentrasi 0,0018 mg/l pada orang dewasa. Adapun jumlah konsumsi aman pada zona sangat tinggi untuk orang dewasa adalah 0,1077 l/hari.

Tabel 27 Strategi Pengelolaan Risiko Karsinogenik Melalui Oral

Cd			
Kategori	Usia	Konsentrasi aman (mg/l)	Jumlah konsumsi aman (l/hari)
Sangat Tinggi	Dewasa	0,0018	0,1077

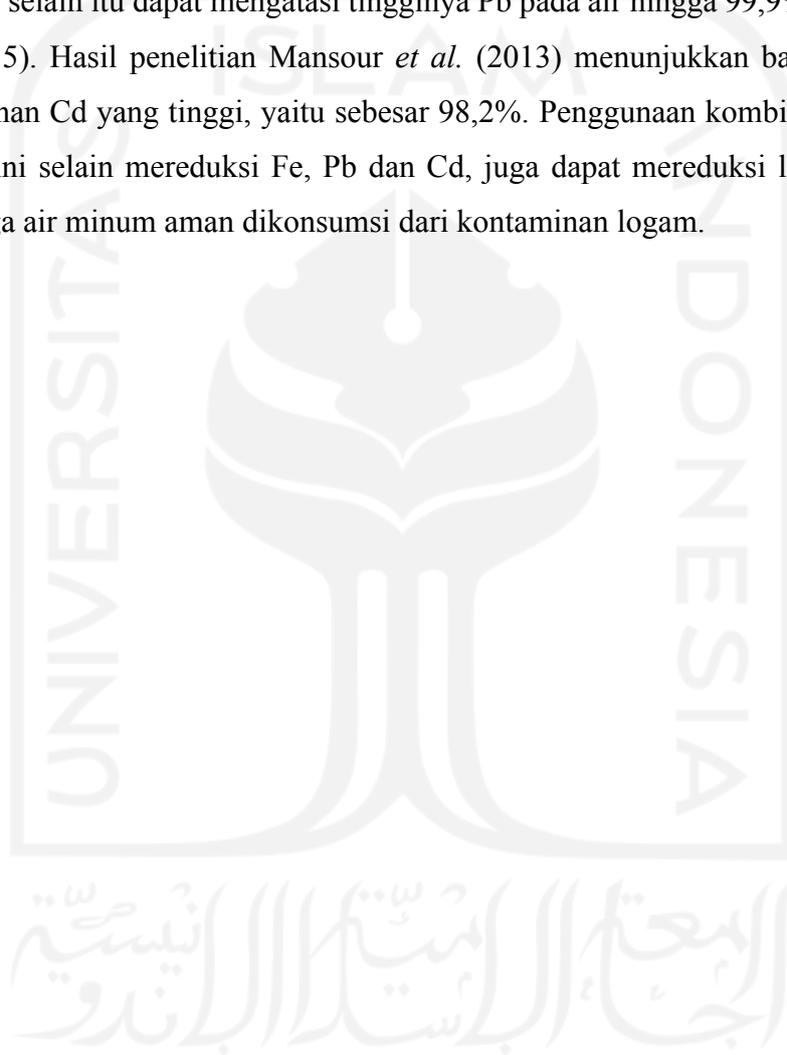
4.5.5. Cara Pengelolaan Risiko dengan Pendekatan Teknologi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa logam pada daerah penelitian sangat tinggi, terlebih pada Fe, Pb dan Cd yang menunjukkan risiko yang tidak aman untuk kesehatan. Untuk mengatasi tingginya logam dilakukan pengolahan-pengolahan yang dapat meminimalisir atau bahkan menghilangkan ketiga logam tersebut dengan teknologi sehingga dapat dikonsumsi dengan aman.

Terdapat beberapa metode teknologi untuk menghilangkan logam dalam air minum. Adapun metode untuk menghilangkan Fe menurut Yazid *et al.* (2021) dapat dengan menggunakan teknik filtrasi, aerasi, adsorpsi, elektrokoagulasi. Setiap metode mempunyai kelebihan dan kekurangan masing-masing. Namun, teknik adsorpsi yang dikombinasikan dengan teknik filtrasi dan aerasi kemudian diikuti oleh teknik elektrokoagulasi (EC) sangat efektif dalam mengurangi kadar Fe

hingga 99,74%. Teknik ini tidak hanya mudah untuk diaplikasikan, namun media yang digunakan juga mudah ditemukan serta harganya pun terjangkau.

EC adalah proses yang terdiri dari pembuatan flok hidroksida logam dalam limbah yang akan dibersihkan, dengan pelarutan elektro anoda terlarut (Mansour *et al.*, 2013). Penggunaan EC ini juga dapat mengurangi kadar kadmium dalam air minum, selain itu dapat mengatasi tingginya Pb pada air hingga 99,9% (Rahman *et al.*, 2015). Hasil penelitian Mansour *et al.* (2013) menunjukkan bahwa efisiensi penyisihan Cd yang tinggi, yaitu sebesar 98,2%. Penggunaan kombinasi beberapa teknik ini selain mereduksi Fe, Pb dan Cd, juga dapat mereduksi logam lainnya sehingga air minum aman dikonsumsi dari kontaminan logam.





“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan berikut:

1. Model interpolasi IDW lebih akurat untuk parameter Pb, Cu, dan Cd dengan urutan keakuratan adalah $Cu > Cd > Pb$ dan model interpolasi UK lebih akurat untuk parameter Fe, Mn, dan Zn dengan urutan keakuratan adalah $Mn > Zn > Fe$.
2. Sumber logam sebagai berikut:
 - a. Logam Pb bersumber dari jaringan asam (sungai asam dan drainase asam) Logam Pb bersumber dari jaringan asam (sungai asam dan drainase asam).
 - b. Logam Mn, Cu, dan Cd tidak dipengaruhi oleh jaringan asam.
3. Hasil analisis tingkat risiko karsinogenik dan non karsinogenik dari paparan melalui oral (air minum) adalah sebagai berikut:
 - a. Logam Mn, Cu, Zn, Mn, dan Pb belum didapati atau belum menimbulkan risiko karsinogenik maupun non karsinogenik pada semua zona.
 - b. Logam Fe untuk usia dewasa pada zona tinggi dan sangat tinggi menunjukkan **tidak aman** dan **berpotensi non karsinogenik** untuk frekuensi pajanan 350 hari/tahun hingga 30 tahun.
 - c. Logam Fe untuk usia anak pada zona sedang, tinggi, dan sangat tinggi menunjukkan **tidak aman** dan **berpotensi non karsinogenik** untuk frekuensi pajanan 350 hari/tahun hingga 6 tahun.
 - d. Logam Pb untuk usia dewasa pada semua zona menunjukkan **tidak aman** dan **berpotensi non karsinogenik** untuk frekuensi pajanan 350 hari/tahun hingga 30 tahun.

- e. Logam Pb untuk usia anak pada semua zona menunjukkan **tidak aman** dan **berpotensi non karsinogenik** untuk frekuensi pajanan 350 hari/tahun hingga 6 tahun.
- f. Logam Cd untuk usia dewasa pada zona tinggi, dan sangat tinggi menunjukkan **tidak aman** dan **berpotensi non karsinogenik** untuk frekuensi pajanan 350 hari/tahun hingga 30 tahun.
- g. Logam Cd untuk usia anak pada zona sangat rendah, rendah, sedang, tinggi, dan sangat tinggi menunjukkan **tidak aman** dan **berpotensi non karsinogenik** untuk frekuensi pajanan 350 hari/tahun hingga 6 tahun.
- h. Logam Cd untuk usia dewasa pada sangat tinggi menunjukkan **tidak aman** dan **berpotensi karsinogenik** untuk frekuensi pajanan 350 hari/tahun hingga 30 tahun.

5.2. Saran

Perlu dibuktikan lebih lanjut mengenai kecocokan metode interpolasi dengan menggunakan penurunan persamaan, perlu dilakukan analisis cara pengelolaan risiko yang lebih baik lagi, serta perlu dilakukan analisis risiko kesehatan lingkungan melalui pajanan lainnya.



DAFTAR PUSTAKA

- 52 North. 2021. **ILWIS**. [Online]. 52north.org. Available from: <https://52north.org/software/software-projects/ilwis/> [Accessed 10 August 2021].
- Ahmad, A.Y., Saleh, I.A., Balakrishnan, P. and Al-Ghouti, M.A. 2021. **Comparison GIS-Based Interpolation Methods for Mapping Groundwater Quality in The State of Qatar**. *Groundwater for Sustainable Development*, 13, p.100573.
- Ali, G., Sajjad, M., Kanwal, S., Xiao, T., Khalid, S., Shoaib, F. and Gul, H.N. 2021. **Spatial-temporal Characterization of Rainfall in Pakistan During The Past Half-century (1961-2020)**. *Scientific Reports*, 11 (6935), pp.1–15.
- Ali Zamani, A., Reza Yaftian, M. and Parizanganeh, A. 2012. **Multivariate Statistical Assessment of Heavy Metal Pollution Sources of Groundwater Around a Lead and Zinc Plant**. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 9 (29), pp.1–10.
- Aminuddin and Andiani. 2015. **Ancaman Air Asam Kawah Ijen**. *Geomagz*, 5 (3), pp.50–53.
- Arslan, H. and Ayyildiz Turan, N. 2015. Estimation of Spatial Distribution of **Heavy Metals in Groundwater Using Interpolation Methods and Multivariate Statistical Techniques; Its Suitability for Drinking and Irrigation Purposes in The Middle Black Sea Region of Turkey**. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187 (8), pp.187–516.
- Arikunto, Suharsimi. 2006. **Prosedur Penelitian Suatu Pendekatan Praktik**. Jakarta: Rineka Cipta.
- Azizullah, A., Khattak, M.N.K., Richter, P. and Häder, D.P. 2011. **Water pollution in Pakistan and Its Impact on Public Health - A Review**. *Environment International*, 37 (2), pp.479–497.
- Badan Pusat Statistik Situbondo. 2011. **Kecamatan Asembagus dalam Angka 2011**. Situbondo: Badan Pusat Statistik.
- Badan Pusat Statistik Situbondo. 2012. **Kecamatan Asembagus dalam Angka 2012**. Situbondo: Badan Pusat Statistik.
- Badan Pusat Statistik Situbondo. 2013. **Kecamatan Asembagus dalam Angka**

2013. Situbondo: Badan Pusat Statistik.
- Badan Pusat Statistik Situbondo. 2014. **Kecamatan Asembagus dalam Angka 2014**. Situbondo: Badan Pusat Statistik.
- Badan Pusat Statistik Situbondo. 2015. **Kecamatan Asembagus dalam Angka 2015**. Situbondo: Badan Pusat Statistik.
- Badan Pusat Statistik Situbondo. 2016. **Kecamatan Asembagus dalam Angka 2016**. Situbondo: Badan Pusat Statistik.
- Badan Pusat Statistik Situbondo. 2017. **Kecamatan Asembagus dalam Angka 2017**. Situbondo: Badan Pusat Statistik.
- Badan Pusat Statistik Situbondo. 2018. **Kecamatan Asembagus dalam Angka 2018**. Situbondo: Badan Pusat Statistik.
- Bashir, B. and Fouli, H. 2015. **Studying The Spatial Distribution of Maximum Monthly Rainfall in Selected Regions of Saudi Arabia Using Geographic Information Systems**. *Arabian Journal of Geosciences*, 8 (11), pp.9929–9943.
- Berezina, N.A. 2001. **Influence of Ambient pH on Freshwater Invertebrates Under Experimental Conditions**. *Russian Journal of Ecology*, 32 (5), pp.343–351.
- Bronowicka-Mielniczuk, U., Mielniczuk, J., Obroślak, R. and Przystupa, W. 2019. **A Comparison of Some Interpolation Techniques for Determining Spatial Distribution of Nitrogen Compounds in Groundwater**. *International Journal of Environmental Research*, 13 (4), pp.679–687.
- Budipramana, E.S., Hapsoro, A., Irmawati, E.S. and Kuntari, S. 2002. **Dental Fluorosis and Caries Prevalence in The Fluorosis Endemic Area of Asembagus, Indonesia**. *International Journal of Paediatric Dentistry*, 12 (6), pp.415–422.
- Cai, K. and Li, C. 2022. **Ecological Risk, Input Flux, and Source of Heavy Metals in the Agricultural Plain of Hebei Province, China**. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19 (4).
- Caudron, C., Syahbana, D.K., Lecocq, T., Van Hinsberg, V., McCausland, W., Triantafyllou, A., Camelbeeck, T., Bernard, A. and Surono. 2015. **Kawah Ijen Volcanic Activity: A Review**. *Bulletin of Volcanology*, 77, 16.
- Chandrasekar, T., Keesari, T., Gopalakrishnan, G., Karuppannan, S., Senapathi, V., Sabarathinam, C. and Viswanathan, P.M. 2021. **Occurrence of Heavy Metals in Groundwater Along the Lithological Interface of K/T Boundary**,

- Peninsular India: A Special Focus on Source, Geochemical Mobility and Health Risk.** *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 80 (1), pp.183–207.
- Chen M, Qin X, Zeng G, Li J. 2016. **Impact on Human Activity Modes and Climate on Heavy Metal “Spread” in Groundwater are Biased.** *Chemosphere* 152: 439-455.
- Chung, S.Y., Venkatramanan, S., Elzain, H.E., Selvam, S. and Prasanna, M. V. 2019. **Supplement of Missing Data in Groundwater-level Variations of Peak Type Using Geostatistical Methods.** *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science*, (March 2020), pp.33–41.
- Delmelle, P. and Bernard, A. 2000. **Downstream Composition Changes of Acidic Volcanic Waters Discharged Into The Banyupahit Stream, Ijen caldera, Indonesia.** *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, pp.55–75.
- Deutsch, Clayton V. 2003. **Encyclopedia of Physical Science and Technology || Geostatistics.** pp.697–707.
- Ding, Q., Cheng, G., Wang, Y. and Zhuang, D. 2017. **Effects of Natural Factors on The Spatial Distribution of Heavy Metals in Soils Surrounding Mining Regions.** *Science of the Total Environment*, 578, pp.577–585. Elsevier B.V.
- Elumalai, V., Nethononda, V.G., Manivannan, V., Rajmohan, N., Li, P. and Elango, L. 2020. **Groundwater Quality Assessment and Application of Multivariate Statistical Analysis in Luvuvhu Catchment, Limpopo, South Africa.** *Journal of African Earth Sciences*, 171, p.103967.
- Esri. 2021. **Exercise 2: Exploring your data.** [Online]. [arcgis.com](https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/exercise-2-exploring-your-data.htm). Available from: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/latest/extensions/geostatistical-analyst/exercise-2-exploring-your-data.htm> [Accessed 3 February 2021].
- Falivene, O., Cabrera, L., Tolosana-Delgado, R. and Sáez, A. 2010. **Interpolation Algorithm Ranking Using Cross-validation and The Role of Smoothing Effect. A Coal Zone Example.** *Computers and Geosciences*, 36 (4), pp.512–519.
- Gentile, M., Courbin, F. and Meylan, G. 2013. **Interpolating Point Spread Function Anisotropy.** *Astronomy and Astrophysics*, 549, p.A1.
- Ghosh, G.C., Khan, M.J.H., Chakraborty, T.K., Zaman, S., Kabir, A.H.M.E. and Tanaka, H. 2020. **Human Health Risk Assessment of Elevated and Variable Iron and Manganese Intake with Arsenic-Safe Groundwater in Jashore, Bangladesh.** *Scientific Reports*, 10 (1), pp.1–9. Springer US.

- Gundogdu, K.S. and Guney, I. 2007. **Spatial Analyses of Groundwater Levels Using Universal Kriging**. *Journal of Earth System Science*, 116 (1), pp.49–55.
- Heikens, A., Widianarko, B., Dewi, I.C., De Boer, J.L.M., Seinen, W. and van Leeuwen, K. 2005. **The impact of The Hyperacid Ijen Crater Lake: Risks of Excess Fluoride to Human Health**. *Environmental Geochemistry and Health*, 27 (5–6), pp.409–418.
- Heikens, A., Widianarko, B., Dewi, I.C., De Boer, J.L.M., Seinen, W. and van Leeuwen, K. 2005a. **The Impact of The Hyperacid Ijen Crater Lake. Part I: Concentrations of Elements in Crops and Soil**. *Environmental Geochemistry and Health*, 27 (5–6), pp.409–418.
- Heikens, A., Widianarko, B., Dewi, I.C., de Boer, J.L.M., Seinen, W. and van Leeuwen, K. 2005b. **The Impact of The Hyperacid Ijen Crater Lake. Part II: A total Diet Study**. *Environmental Geochemistry and Health*, 27 (5–6), pp.475–483.
- Herojeet, R., Rishi, M.S. and Kishore, N. 2015. **Integrated Approach of Heavy Metal Pollution Indices and Complexity Quantification Using Chemometric Models in The Sirsa Basin, Nalagarh Valley, Himachal Pradesh, India**. *Chinese Journal of Geochemistry*, 34 (4), pp.620–633.
- Hou, Q., Zhang, Q., Huang, G., Liu, C. and Zhang, Y. 2020. **Elevated Manganese Concentrations in Shallow Groundwater of Various Aquifers in a Rapidly Urbanized Delta, South China**. *Science of the Total Environment*, 701, p.134777. Elsevier B.V.
- Hua, Z., Debai, M., Cheng, W. 2009. **Optimization of the spatial interpolation for groundwater depth in Shule River Basin**. *Environmental Science and Information Application Technology*. ESIAT 2009.
- IARC. 2011. **Agents classified by the IARC monographs**. In Oxford Handbook of Occupational Health; OUP Oxford: Oxford, UK.
- International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC). 2001. **ILWIS 3.0 Academic User's Guide. Unit Geo Software Development Sector Remote Sensing & GIS IT Department, Enschede, The Netherlands.-**
- Kalivas, D.P., Kollias, V.J. and Apostolidis, E.H. 2013. **Evaluation of Three Spatial Interpolation Methods to Estimate Forest Volume in the Municipal Forest of The Greek Island Skyros**. *Geo-Spatial Information Science*, 16 (2), pp.100–112.
- Kamble, K.H. and Aggrawal, P. 2011. **Geostatistical Analyst for Deciding Optimal Interpolation Strategies for Delineating Compact Zones**.

International Journal of Geosciences, 2 (4), pp.585–596.

- Khalid, S., Shahid, M., Natasha, Shah, A.H., Saeed, F., Ali, M., Qaisrani, S.A. and Dumat, C. 2020. **Heavy Metal Contamination and Exposure Risk Assessment Via Drinking Groundwater in Vehari, Pakistan.** *Environmental Science and Pollution Research*, 27 (32), pp.39852–39864.
- Kim, J.J., Kim, Y.S. and Kumar, V. 2019. **Heavy Metal Toxicity: An Update of Chelating Therapeutic Strategies.** *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 54, pp.226–231.
- Kiš, I.M. 2016. **Comparison of Ordinary and Universal Kriging Interpolation Techniques on a Depth Variable (a Case of Linear Spatial Trend), Case Study of The Šandrovac Field.** *Rudarsko Geolosko Naftni Zbornik*, 31 (2), pp.41–58.
- Kumar, V. 2007. **Optimal Contour Mapping of Groundwater Levels Using Universal Kriging - A Case Study.** *Hydrological Sciences Journal*, 52 (5), pp.1038–1050.
- Kovács, E., János, T., Frančišković-Bilinski, S., Omanović, D., Bilinski, H. and Pižeta, I. 2012. **Geochemical Study of Surface Water and Sediment at The Abandoned pb-zn Mining Site at Gyöngyösoroszi, Hungary.** *Fresenius Environmental Bulletin*, 21 (5 A), pp.1212–1218.
- Li, J., Heap, A.D. 2011. **A review of comparative studies of spatial interpolation methods in environmental sciences: performance and impact factors.** *Ecol. Inf.* 6 (3–4), pp.228–241.
- Li, P., Karunanidhi, D., Subramani, T. and Srinivasamoorthy, K. 2021. **Sources and Consequences of Groundwater Contamination.** *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 80, pp.1–10.
- Löhr, A.J., Bogaard, T.A., Heikens, A., Hendriks, M.R., Sumarti, S., Van Bergen, M.J., Van Gestel, C.A.M., Van Straalen, N.M., Vroon, P.Z. and Widianarko, B. 2005. **Natural Pollution Caused by the Extremely Acidic Crater Lake Kawah Ijen, East Java, Indonesia.** *Environmental Science and Pollution Research*, 12 (2), pp.89–95.
- Lönnerdal, B. 2017. **Excess Iron Intake as a Factor in Growth, Infections, and Development of Infants and Young Children,** *American Journal of Clinical Nutrition*, 106, pp. 1681S-1687S.
- Lou, S., Liu, S., Dai, C., Tao, A., Tan, B., Ma, G., Chalov, R.S. and Chalov, S.R. 2017. **Heavy Metal Distribution and Groundwater Quality Assessment for**

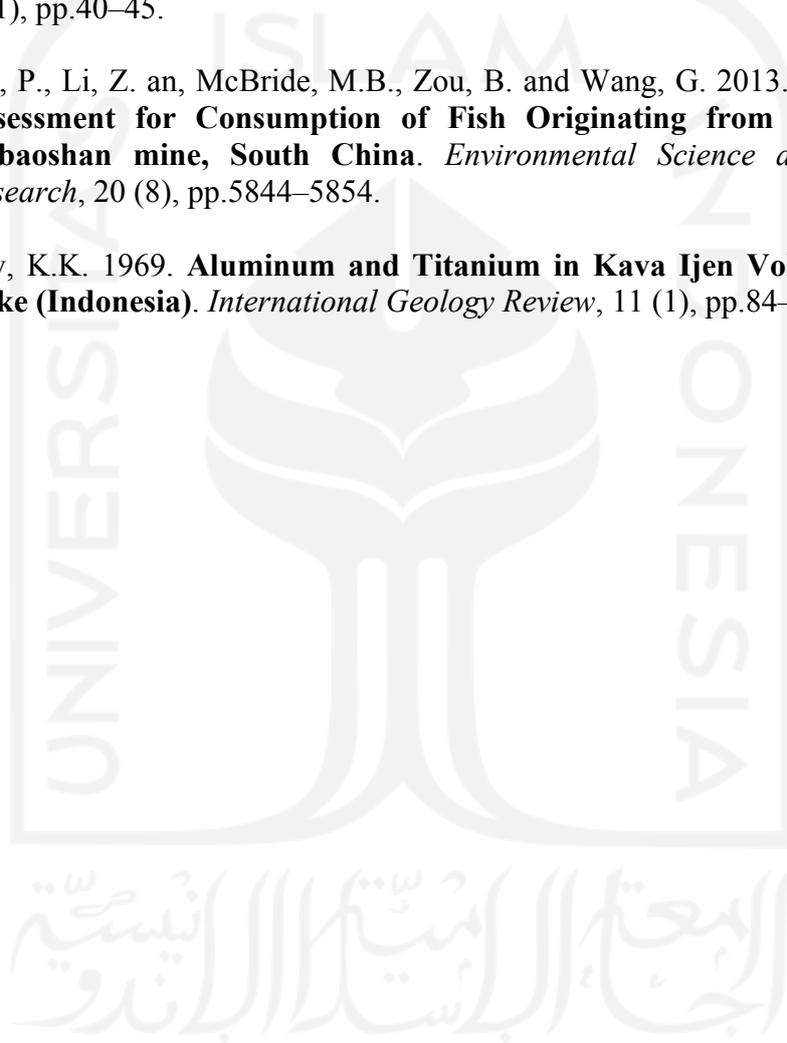
- a Coastal Area on a Chinese Island.** *Polish Journal of Environmental Studies*, 26 (2), pp.733–745.
- Manne, R., Kumaradoss, M.M.R.M., Iska, R.S.R., Devarajan, A. and Mekala, N. 2022. **Water Quality and Risk Assessment of Copper Content in Drinking Water Stored in Copper Container.** *Applied Water Science*, 12 (3), pp.1–8.
- Mansour, S.E., Negim, E.M., Hasieb, I.H., Desouky, O.A., Abdykalykova, R. and Beisebekov, M. 2013. **Removal of Cadmium Pollutants in Drinking Water Using Alternating Current Electrocoagulation.** *Global Journal of Environmental Research*, 7 (3), pp.45–51.
- Mihaljevic, M. 1999. **Encyclopedia of Geochemistry.** Germany: Kluwer Academic Publishers.
- Mitra, P., Sharma, S., Purohit, P. and Sharma, P. 2017. **Clinical and Molecular Aspects of Lead Toxicity: An Update.** *Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences*, 54 (7–8), pp.506–528. Informa Healthcare USA, Inc.
- Myers, D. E. 1991. **Interpolation and estimation with spatially located data.** *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 11(3), pp. 209–228.
- NAP. 2002. **Dietary Reference Intakes for Vitamin A, Vitamin K, Arsenic, Boron, Chromium, Copper, Iodine, Iron, Manganese, Molybdenum, Nickel, Silicon, Vanadium, and Zinc.** Washington, D.C.: National Academy Press.
- Nijmeijer, R., de Haas, A., Dost, R. J. J., & Budde, P. E. 2001. **ILWIS 3.0 Academic : User's Guide.** ITC, ILWIS.
- Nordberg, G.F., Bernard, A., Diamond, G.L., Duffus, J.H., Illing, P., Nordberg, M., Bergdahl, I.A., Jin, T. and Skerfving, S. 2018. **Risk Assessment of Effects of Cadmium on Human Health (IUPAC Technical Report).** *Pure and Applied Chemistry*, 90 (4), pp.755–808.
- Omwene, P.I., Öncel, M.S., Çelen, M. and Kobya, M. 2018. **Heavy Metal Pollution and Spatial Distribution in Surface Sediments of Mustafakemalpaşa Stream located in The World's Largest Borate Basin (Turkey).** *Chemosphere*, 208, pp.782–792.
- Parisi, S., Paternoster, M., Perri, F. and Mongelli, G. 2011. **Source and Mobility of Minor and Trace Elements in a Volcanic Aquifer System: Mt. Vulture (Southern Italy).** *Journal of Geochemical Exploration*, 110 (3), pp.233–244.
- Park, N. and Kim, S. 2021. **Flexsketch: Estimation of probability Density for Stationary and Non-stationary Data Streams.** *Namuk Park Songkuk Kim*, 21

(4), pp.1–19.

- Pearson, K. 1901. LIII. **On lines and planes of closest fit to systems of points in space.** *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 2 (11), pp.559–572.
- Pristiyanto, T.R. 2019. **Analisis Kandungan Logam (Fe, Cd, Cu, Zn, Pb, dan Mn) pada Air Tanah dan Potensi Risiko Lingkungan di Kecamatan Asembagus Situbondo.** [Thesis]. Universitas Islam Indonesia. Yogyakarta.
- Profillidis, V.A. and Botzoris, G.N. 2019. **Statistical Methods for Transport Demand Modeling.** In: *Modeling of Transport Demand*. pp.163–224.
- Rahman, S.H., Yesmin, R.A., Islam, S.N., Siraj, S., Adyel, T.M. and Ahmed, M.S. 2015. **Removal of Lead from Battery Effluent by Electrocoagulation.** *Journal of Bangladesh Academy of Sciences*, 39 (2), pp.125–134.
- Rajni K, Keshav K. 2010. Water pollution: management, control and treatment. **New Age International.** New Delhi.
- Razali, M. and Wandu, R. 2019. **Inverse Distance Weight Spatial Interpolation for Topographic Surface 3D Modelling.** *TECHSI*, 11 (3), p.385.
- Republik Indonesia. 2001. **Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 82 Tahun 2001 Tentang Pengelolaan Kualitas Air dan Pengendalian Pencemaran Air.** Jakarta.
- Republik Indonesia. 2010. **Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 492 Tentang Persyaratan Kualitas Air Minum.** Jakarta.
- Rehman, K., Fatima, F., Waheed, I. and Akash, M.S.H. 2018. **Prevalence of Exposure of Heavy Metals and Their Impact on Health Consequences.** *Journal of Cellular Biochemistry*, 119, pp.157–184.
- Sasongko, E.B., Widyastuti, E. and Priyono, R.E. 2014. **Kajian Kualitas Air Dan Penggunaan Sumur Gali Oleh Masyarakat Di Sekitar Sungai Kaliyasa Kabupaten Cilacap.** *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 12 (2), p.72.
- Singh, P. and Verma, P. 2019. **A Comparative Study of Spatial Interpolation Technique (IDW and Kriging) for Determining Groundwater Quality.** In: *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science*. pp.43–56.
- Singh, U.K. and Kumar, B. 2017. **Pathways of Heavy Metals Contamination and Associated Human Health Risk in Ajay River Basin, India.** *Chemosphere*, 174 (17), pp.183–199.

- Smolders, E.; Mertens, J. 2013. **Cadmium. In Heavy Metals in Soils: Trace Metals and Metalloids in Soils and Their Bioavailability**; Alloway, B.J., Ed.; Springer: Dordrecht, The Netherlands; pp. 283–311.
- Su, Z., Wu, J., He, X. and Elumalai, V. 2020. **Temporal Changes of Groundwater Quality Within the Groundwater Depression Cone and Prediction of Confined Groundwater Salinity Using Grey Markov Model in Yinchuan Area of Northwest China.** *Exposure and Health*, 12 (3), pp.447–468.
- Tabachnick BG, Fidell LS. 2001. **Using Multivariate Statistics**, 4th edn. Allyn and Bacon, Boston.
- Taylor, A.A., Tsuji, J.S., Garry, M.R. *et al.* 2020. **Critical Review of Exposure and Effects: Implications for Setting Regulatory Health Criteria for Ingested Copper.** *Environmental Management* 65, pp 131–159.
- Thuyet, D.Q., Saito, H., Saito, T., Moritani, S., Kohgo, Y. and Komatsu, T. 2016. **Multivariate Analysis of Trace Elements in Shallow Groundwater in Fuchu in Western Tokyo Metropolis, Japan.** *Environmental Earth Sciences*, 75 (7), pp.1–14.
- Tiwari, S., Tripathi, I.P., Gandhi, M., Gramoday, C. and Tiwari, H. 2013. **Effects of Lead on Environment.** *Engineering Research in Management and Technology*, 2 (6), pp.1–5.
- USEPA. 2004. **Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I: Human Health Evaluation Manual (Part E, Supplemental Guidance for Dermal Risk Assessment).** Washington, DC, USA: EPA/540/R/99/005. OSWER 9285. 7-02EP PB99–963312.
- USEPA (United States Environmental Protection Agency). 2011. **Exposure factors handbook 2011 edition (Final report).** Washington (DC): USEPA. <http://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deidD236252>.
- van Rotterdam-Los, A.M.D., Heikens, A., Vriend, S.P., van Bergen, M.J. and van Gaans, P.F.M. 2008. **Impact of Acid Affluent From Kawah Ijen Crater Lake on Irrigated Agricultural Soils: Soil Chemical Processes and Plant Uptake.** *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 178 (2), pp.287–296.
- WHO. 1996. **Trace Elements in Human Nutrition and Health World Health Organization.** *World Health Organization*.
- WHO. 1973. **Trace Elements in Human Nutrition and Health World Health Organization.** *World Health Organization*.

- Xie, Y., Chen, T. Bin, Lei, M., Yang, J., Guo, Q.J., Song, B. and Zhou, X.Y. 2011. **Spatial Distribution of Soil Heavy Metal Pollution Estimated by Different Interpolation Methods: Accuracy and Uncertainty Analysis.** *Chemosphere*, 82 (3), pp.468–476.
- Yazid, E.A., Wafi, A. and Saraswati, A. 2021. **Techniques for Reducing Iron (Fe) Content in Groundwater: an Article Review.** *Journal of Islamic Pharmacy*, 6 (1), pp.40–45.
- Zhuang, P., Li, Z. an, McBride, M.B., Zou, B. and Wang, G. 2013. **Health Risk Assessment for Consumption of Fish Originating from Ponds Near Dabaoshan mine, South China.** *Environmental Science and Pollution Research*, 20 (8), pp.5844–5854.
- Zelenov, K.K. 1969. **Aluminum and Titanium in Kava Ijen Volcano Crater Lake (Indonesia).** *International Geology Review*, 11 (1), pp.84–93.





“Halaman ini sengaja dikosongkan”

RIWAYAT HIDUP

Auniatul Aulia biasa disapa Lia, lahir di Kendal, 8 Februari 2000 dan merupakan anak tunggal. Peneliti menempuh pendidikan di SMA N 1 Kendal, Jawa Tengah. Sekarang peneliti sedang menyelesaikan studi Sarjana Strata 1 (S1) Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.

