



JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Analisis Distribusi Spasial Logam Berat Kadmium (Cd) pada Air Tanah Menggunakan Metode Interpolasi Geospasial di Dataran Rendah Rawa Pening

Bayu Prasetyo

22513010

Dosen Pembimbing:

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

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

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana

Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan

Universitas Islam Indonesia

2026



**JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN**

BACHELOR THESIS

Spatial Distribution Analysis of Cadmium (Cd) in Groundwater Using Geospatial Interpolation Methods in the Rawa Pening Lowland Area

Bayu Prasetyo

22513010

Supervisor:

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

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

Environmental Engineering Bachelor Program

Faculty of Civil Engineering and Planning

Universitas Islam Indonesia

2026

LEMBAR PENGESAHAN

TUGAS AKHIR

Analisis Distribusi Spasial Logam Berat Kadmium (Cd) pada Air Tanah Menggunakan Metode Interpolasi Geospasial di Dataran Rendah Rawa Pening

Tugas akhir ini disusun dan diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik (S.T.) pada Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.

Bayu Prasetyo

22513010

Tugas akhir ini telah diuji pada tanggal 7 Juli 2026 dan disetujui oleh:



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

(Pembimbing 1)



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

(Pembimbing 2)



Lutfia Isna Ardhayanti, S.Si., M.Sc., Ph.D.

(Penguji)

Mengetahui,

Ketua Prodi Teknik Lingkungan Program Sarjana



Ir. Any Juliani, S.T., M.Sc. (Res. Eng.), Ph.D.

PERNYATAAN

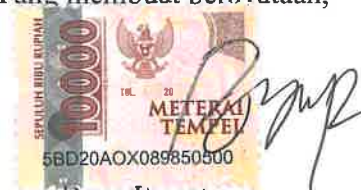
Saya, penyusun tugas akhir ini, menyatakan bahwa:

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 merupakan gagasan, rumusan, dan studi 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. Perangkat lunak atau program komputer yang digunakan dalam tugas akhir ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab saya. Bukan tanggung jawab Universitas Islam Indonesia.
5. Tidak ada penggunaan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*, AI) dalam penyusunan karya tugas akhir ini kecuali:
 - a. untuk membantu dalam kadar yang wajar (seperti membantu mengoreksi, mencari ide, dan mencari referensi), dan
 - b. tercantum dan dijelaskan perihal penggunaannya secara eksplisit di dalam karya tugas akhir ini.

Implikasi dari penggunaan AI tersebut menjadi tanggung jawab saya sepenuhnya.

6. Pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya. Apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, saya bersedia menerima sanksi akademik dengan pencabutan gelar yang sudah diperoleh serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang berlaku di perguruan tinggi.

Yogyakarta, 16 Juli 2026
Yang membuat pernyataan,



Bayu Prasetyo
22513010

PRAKATA

Assalamu 'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah *Subhanahu wa Ta'ala* atas segala rahmat, nikmat, kesehatan, serta kemudahan yang telah diberikan sehingga penulis dapat menyelesaikan Laporan Tugas Akhir yang berjudul “Analisis Spasial Kualitas Air Tanah Berdasarkan Konsentrasi Kadmium (Cd) di Kawasan Dataran Rendah Sekitar Rawa Pening Menggunakan Metode Interpolasi *Inverse Distance Weighting* (IDW)” dengan baik. Penyusunan tugas akhir ini dilakukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Penulis menyadari bahwa proses penyusunan tugas akhir ini tidak terlepas dari bantuan, dukungan, doa, serta bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Allah SWT yang senantiasa memberikan kekuatan, kesehatan, kelancaran, dan kemudahan kepada penulis selama menjalani proses perkuliahan hingga penyelesaian tugas akhir ini.
2. Kedua orang tua tercinta, Bapak Trubus Santoso dan Ibu Tati Sulastri, yang selalu memberikan doa, kasih sayang, perhatian, dukungan moral maupun materi, serta menjadi sumber semangat terbesar dan alasan paling utama bagi penulis dalam menyelesaikan pendidikan.
3. Ibu Any Juliani, S.T., M.Sc. (Res.Eng), Ph.D. selaku Ketua Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak Dhandhun Wacano, S.Si., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktu, memberikan arahan, ilmu, motivasi, dan bimbingan selama proses penelitian dan penyusunan laporan tugas akhir.
5. Ibu Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D. selaku dosen pembimbing II yang telah memberikan masukan, saran, dan bimbingan sehingga laporan tugas akhir ini dapat tersusun dengan lebih baik.

6. Ibu Lutfia Isna Ardhayanti, S.Si., M.Sc., Ph.D. selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik, saran, dan evaluasi yang membangun demi penyempurnaan laporan tugas akhir ini.
7. Seluruh dosen Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia yang telah memberikan ilmu, pengalaman, dan pembelajaran selama masa perkuliahan.
8. Seluruh pihak laboratorium dan instansi terkait yang telah membantu penulis selama proses pengujian laboratorium, pengambilan data, dan pelaksanaan penelitian di lapangan.
9. Masyarakat dan pihak terkait di lokasi penelitian yang telah membantu serta memberikan informasi selama proses penelitian berlangsung.
10. Teman-teman seperjuangan Teknik Lingkungan angkatan 2022 yang telah memberikan pengalaman, bantuan, semangat, dan kebersamaan selama masa perkuliahan.
11. Rekan satu tim penelitian, Ahmad Afifudin Syakuri dan Dinnur Aprilliani, yang telah berjuang dan bekerja sama selama proses penelitian dan penyusunan tugas akhir.
12. Seluruh keluarga, sahabat, dan teman dekat penulis yang selalu memberikan dukungan, bantuan, motivasi, serta menjadi tempat berbagi selama proses penyusunan tugas akhir.
13. Terakhir, kepada diri penulis sendiri, Bayu Prasetyo, yang telah berusaha, bertahan, dan terus berproses hingga mampu menyelesaikan seluruh tahapan tugas akhir ini dengan baik.

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih memiliki kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi perbaikan di masa mendatang. Penulis berharap laporan ini dapat memberikan manfaat dan menjadi referensi dalam bidang kualitas air tanah dan lingkungan.

Wassalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Sleman, 16 Juli 2026



Bayu Prasetyo

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Analisis Distribusi Spasial Logam Berat Kadmium (Cd) pada Air Tanah Menggunakan Metode Interpolasi Geospasial di Dataran Rendah Rawa Pening

Mahasiswa : Bayu Prasetyo
NIM : 22513010
Program Studi : Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing : Dhandhun Wacano, S.Si., M.Sc., Ph.D.
Pembimbing II : Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.

Abstrak

Air tanah di kawasan dataran rendah sekitar Rawa Pening masih dimanfaatkan masyarakat untuk kebutuhan domestik, namun peningkatan aktivitas pertanian dan permukiman berpotensi menurunkan kualitas air tanah akibat pencemaran logam berat Kadmium (Cd). Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi konsentrasi Cd, menganalisis distribusi spasialnya menggunakan metode interpolasi *Inverse Distance Weighting* (IDW), serta mengkaji keterkaitan kondisi lingkungan dan aktivitas penggunaan lahan terhadap pola sebaran Cd. Penelitian dilakukan pada delapan titik sampling sumur warga dengan pengukuran parameter *in situ* berupa pH, suhu, *Electrical Conductivity* (EC), dan *Total Dissolved Solid* (TDS), serta pengujian Cd menggunakan metode *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry* (ICP-MS). Hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi Cd berkisar antara 0,00046–0,01075 mg/L, dengan satu titik melebihi baku mutu Permenkes No. 2 Tahun 2023. Hasil interpolasi spasial menunjukkan adanya *hotspot* konsentrasi Cd di wilayah tengah penelitian yang mengindikasikan pengaruh faktor lingkungan lokal dan aktivitas penggunaan lahan di sekitar titik sampling. Hubungan antara parameter *in situ* dan konsentrasi Cd menunjukkan korelasi yang relatif lemah, sehingga distribusi Cd tidak dipengaruhi secara langsung oleh kondisi kualitas air tanah secara umum, melainkan cenderung dipengaruhi oleh karakteristik lingkungan dan aktivitas setempat. Metode IDW mampu menggambarkan pola distribusi spasial Cd secara cukup representatif dan mendukung identifikasi area yang berpotensi mengalami pencemaran di kawasan sekitar Rawa Pening.

Kata kunci: air tanah, distribusi spasial, interpolasi IDW, kadmium (Cd), kualitas air tanah.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

Spatial Distribution Analysis of Cadmium (Cd) in Groundwater Using Geospatial interpolation Methods in the Rawa Pening Lowland Area

Student : Bayu Prasetyo
Student Number : 22513010
Study Program : Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor : Dhandhun Wacano, S.Si., M.Sc., Ph.D.
Supervisor II : Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.

Abstract

Groundwater in the lowland area surrounding Rawa Pening is still utilized by local communities for domestic purposes. However, the increasing intensity of agricultural and settlement activities has the potential to reduce groundwater quality due to contamination by heavy metals, particularly Cadmium (Cd). This study was conducted to identify Cd concentrations in groundwater, analyze their spatial distribution using the Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method, and assess the relationship between environmental conditions and land-use activities with the distribution pattern of Cd within the study area. Groundwater samples were collected from eight household wells, followed by in situ measurements of pH, temperature, Electrical Conductivity (EC), and Total Dissolved Solids (TDS), while Cd concentrations were analyzed using the Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) method. The results indicated that Cd concentrations ranged from 0.00046 to 0.01075 mg/L, with one sampling location exceeding the groundwater quality standard established by the Indonesian Minister of Health Regulation (Permenkes) No. 2 of 2023. Spatial analysis revealed the presence of a Cd concentration hotspot in the central part of the study area, indicating the influence of local environmental factors and surrounding land-use activities. Furthermore, the relationship between in situ parameters and Cd concentrations showed relatively weak correlations, suggesting that Cd distribution was not directly influenced by general groundwater quality conditions but was more likely controlled by site-specific environmental characteristics and local activities. Overall, the IDW interpolation method was able to represent the spatial distribution pattern of groundwater Cd reasonably well and support the identification of areas potentially affected by contamination, providing useful information for groundwater quality management in the Rawa Pening lowland area.

Key words: groundwater, spatial distribution, Inverse Distance Weighting (IDW), Cadmium (Cd), groundwater quality.

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	v
ABSTRAK	viii
<i>ABSTRACT</i>.....	x
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR TABEL	xv
DAFTAR GAMBAR.....	xvi
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN	1
1. 1 Latar Belakang	1
1. 2 Rumusan Masalah	3
1. 3 Tujuan	3
1. 4 Manfaat	4
1. 5 Ruang Lingkup.....	4
1. 6 Kerangka Berpikir.....	5
BAB II	7
TINJAUAN PUSTAKA.....	7
2.1 Air Tanah	7
2.2 Kualitas Air Tanah	8
2.2.1 Kadmium (Cd)	8
2.3 Sistem Informasi Geografis (SIG)	9
2.3.1 <i>Inverse Distance Weighting (IDW)</i>	9
2.3.2 <i>Kriging</i>	9
2.3.3 <i>Natural Neighbor</i>	10
2.3.4 <i>Spline</i>	10
2.4 Penelitian Terdahulu	11
BAB III.....	14
METODE PENELITIAN.....	14
3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian	14
3.2 Alat dan Bahan.....	15

3.2.1	Perangkat Penelitian.....	15
3.2.2	Pengambilan Sampel.....	16
3.2.3	Pengujian Kadmium (Cd)	16
3.3	Prosedur Analisis Data.....	17
3.3.1	Tahapan Penelitian.....	17
3.3.2	Pengumpulan Data	18
3.3.3	Pengolahan Analisis Data	22
BAB IV		29
HASIL PENELITIAN DAN ANALISIS DATA		29
4.1	Kondisi Wilayah Eksisting	29
4.1.1	Letak dan Administrasi Wilayah	29
4.1.2	Batas dan Cakupan Wilayah Penelitian	30
4.1.3	Kondisi Fisik dan Hidrogeologi.....	31
4.1.4	Aktivitas dan Potensi Sumber Pencemar	32
4.2	Hasil Pengukuran Parameter <i>in situ</i> dan Konsentrasi Cd	33
4.2.1	Hasil Pengukuran Parameter <i>in situ</i>	33
4.2.2	Hasil Analisis Konsentrasi Kadmium (Cd).....	36
4.2.3	Analisis Statistik Deskriptif dan Presisi Data	39
4.3	Hubungan Parameter <i>in situ</i> terhadap Konsentrasi Kadmium.....	40
4.3.1	Hubungan pH terhadap Konsentrasi Cd	40
4.3.2	Hubungan Suhu terhadap Konsentrasi Cd	42
4.3.3	Hubungan TDS dan EC terhadap Konsentrasi Cd.....	43
4.3.4	Analisis Kondisi pada Setiap Titik Sampling	46
4.3.5	Sintesis Hubungan Antarparameter	47
4.4	Potensi Sumber Pencemar terhadap Kualitas Air Tanah	48
4.4.1	Sumber Pencemar Antropogenik	48
4.4.2	Faktor Lingkungan Alami.....	49
4.4.3	Keterkaitan Penggunaan Lahan dengan Distribusi Kadmium	49
4.5	Analisis <i>Hotspot</i> dan Distribusi Spasial.....	51
4.5.1	Hasil Interpolasi Distribusi Spasial Parameter <i>in situ</i>	51
4.5.2	Hasil Interpolasi Distribusi Spasial Kadmium (Cd)	56
4.5.3	Interpretasi <i>Hotspot</i> Konsentrasi Kadmium (Cd)	57
4.5.4	Statistik Model Interpolasi	57

4. 5. 5	Interpretasi Kelayakan dan Keterbatasan Model	65
4.6	Rekomendasi Pengelolaan Air Tanah terhadap Potensi Pencemaran Kadmium (Cd)	66
4. 6. 1	Monitoring Kualitas Air Tanah pada Area Prioritas.....	67
4. 6. 2	Pengelolaan Penggunaan Lahan Pertanian Secara Berkelanjutan	67
4. 6. 3	Perlindungan Daerah Resapan dan Sumber Air Tanah.....	68
4. 6. 4	Pengelolaan Lingkungan dan Edukasi Masyarakat	68
BAB V		70
KESIMPULAN DAN SARAN		70
5. 1	Kesimpulan	70
5. 2	Saran	71
DAFTAR PUSTAKA		72
LAMPIRAN		78
RIWAYAT HIDUP		85

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Baku Mutu Kualitas Air.....	8
Tabel 2. 2 Penelitian Terdahulu	11
Tabel 4. 1 Kondisi Eksisting Titik Sampling.....	33
Tabel 4. 2 Hasil Pengukuran Parameter pH.....	34
Tabel 4. 3 Hasil Pengukuran Parameter Suhu	35
Tabel 4. 4 Hasil pengukuran Parameter Electricity Conductivity (EC).....	35
Tabel 4. 5 Hasil Pengukuran Parameter Total Dissolved Solid (TDS).....	36
Tabel 4. 6 Hasil Pengukuran Konsentrasi Kadmium (Cd)	37
Tabel 4. 7 Hasil Analisis Statistik Deskriptif Sampel.....	39
Tabel 4. 8 Hasil Statistik Cross Validation Interpolasi IDW.....	58
Tabel 4. 9 Hasil Cross Validation Konsentrasi Kadmium (Cd).....	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Kerangka Berpikir Penelitian.....	6
Gambar 3. 1 Peta Lokasi Titik Sampling.....	15
Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian	17
Gambar 3. 3 Diagram Alir Analisis Penentuan Wilayah Studi	23
Gambar 3. 4 Diagram Alir Analisis Data Kualitas Air tanah dengan IDW.	25
Gambar 3. 5 Diagram Alir Analisis Data Hasil Survei.....	27
Gambar 4. 1 Kondisi Eksisting Wilayah Penelitian.....	29
Gambar 4. 2 Rawa Pening	30
Gambar 4. 3 Kondisi Sumur	31
Gambar 4. 4 Perbandingan Konsentrasi Cd dengan Baku Mutu	38
Gambar 4. 5 Hubungan Logam Cd dengan pH.....	41
Gambar 4. 6 Hubungan Logam Cd dengan pH (Pembesaran Grafik)	41
Gambar 4. 7 Hubungan Logam Cd dengan Suhu	42
Gambar 4. 8 Hubungan Logam Cd dengan Suhu (Pembesaran Grafik).....	43
Gambar 4. 9 Hubungan Logam Cd dengan TDS	44
Gambar 4. 10 Hubungan Logam Cd dengan EC (Pembesaran Grafik).....	44
Gambar 4. 11 Hubungan Logam Cd dengan EC	45
Gambar 4. 12 Hubungan Logam Cd dengan TDS (Pembesaran Grafik) ...	45
Gambar 4. 13 Peta Pola Persebaran IDW Parameter pH	51
Gambar 4. 14 Peta Pola Persebaran IDW Parameter Suhu.....	52
Gambar 4. 15 Peta Pola Persebaran IDW Parameter TDS	54
Gambar 4. 16 Peta Pola Persebaran IDW Parameter EC	54
Gambar 4. 17 Peta Pola Persebaran IDW Parameter Kadmium (Cd).....	56
Gambar 4. 18 Perbandingan Grafik <i>Predicted Cross Validation</i> dari Setiap Parameter	60
Gambar 4. 19 Perbandingan Grafik <i>Error Cross Validation</i> dari Setiap Parameter	62
Gambar 4. 20 Perbandingan Grafik <i>Distribution Cross Validation</i> dari Setiap Parameter	64

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi Pengambilan Sampel.....	78
Lampiran 2. Titik Koordinat.....	81
Lampiran 3. Pengujian Sampel di Laboratorium.....	82
Lampiran 4. Kurva Kalibrasi	82
Lampiran 5. Hasil Pengujian Parameter <i>In Situ</i> dan Kadmium (Cd).....	83
Lampiran 6. Hasil pengujian Duplo Cd Setiap Titik Sampling	84

“Halaman ini sengaja dikosongkan”

BAB I

PENDAHULUAN

1. 1 Latar Belakang

Air tanah merupakan salah satu sumber daya alam esensial yang berperan penting dalam menunjang kebutuhan hidup manusia. Pemanfaatannya mencakup berbagai sektor, mulai dari kebutuhan rumah tangga, pertanian, hingga industri. Secara umum, air tanah adalah air yang tersimpan di dalam pori-pori tanah atau celah batuan di bawah permukaan bumi. Meskipun ketersediaannya melimpah, hal tersebut tidak selalu menjamin bahwa kualitas air tanah memenuhi standar untuk dikonsumsi. Kualitas air tanah sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti karakteristik geologi wilayah, aktivitas manusia (antropogenik), serta jenis penggunaan lahan di sekitarnya (Kodoatie & Sjarief, 2021).

Rawa Pening memiliki luas 2670 ha sekaligus menjadi danau alami terbesar di Jawa Tengah. Danau ini terletak di antara beberapa kecamatan di Semarang, antara lain Ambarawa, Bawen, Tuntang, dan Banyubiru (Wulandari, 2022). Danau ini dikelilingi oleh beberapa gunung seperti Gunung Merbabu, Gunung Telomoyo, dan Gunung Ungaran. Hal ini mengakibatkan danau ini berada di cekungan lereng gunung dan memiliki tanah dengan jenis vulkanis (Winarmadani, 2019).

Rawa Pening sangat penting untuk menjadi sumber kehidupan masyarakat, ekosistem, dan perekonomian wilayah di sekitarnya. Danau ini menyediakan sumber daya air untuk kegiatan pertanian, perikanan, dan kebutuhan domestik (Wulandari, 2022). Rawa Pening memiliki ancaman serius dan menjadi salah satu danau kritis di Indonesia yang ditetapkan pada Konferensi Nasional Danau Indonesia I pada tanggal 13-15 Agustus 2009 (Widodo *et al.*, 2022). Hal ini disebabkan oleh eutrofikasi berupa *blooming* eceng gondok yang tak terkendali, laju sedimentasi yang cukup tinggi, dan degradasi lingkungan yang terjadi pada danau ini (Heriza *et al.*, 2018).

Kuantitas danau ini bertambah secara terus menerus karena berasal dari air tanah dan curah hujan. Aliran air yang berasal dari beberapa gunung menyebabkan kualitas air danau ini mengalami penurunan secara terus menerus. Beberapa faktor lain juga mempengaruhi penurunan kualitas air di danau ini, seperti erosi pada

DAS, pupuk dan sisa pestisida dari kegiatan di lahan pertanian, serta limbah dari peternakan dan domestik dari aktivitas sehari-hari warga. Faktor luar danau dapat berasal dari limbah domestik rumah tangga yang masuk ke dalam air tanah. Adapun faktor dari dalam danau yang berasal dari kegiatan perikanan dan pariwisata yang ada dilakukan di wilayah danau (Hidayah, 2012).

Kegiatan manusia yang semakin meningkat, baik di sektor pertanian, pemukiman, maupun industri, secara tidak langsung menjadi penyebab utama menurunnya kualitas air tanah. Air sumur yang digunakan masyarakat berpotensi tercemar oleh limbah domestik serta sisa pupuk kimia yang masuk ke lapisan tanah. Pencemar utama yang sering ditemukan adalah logam berat kadmium (Cd), salah satu unsur *non-esensial* yang bersifat toksik dan berbahaya bagi kesehatan manusia. Akumulasi logam ini dalam tubuh dapat memicu gangguan fungsi ginjal, sistem saraf, serta peredaran darah jika melebihi ambang batas baku mutu air minum sebagaimana tercantum dalam Permenkes No. 492 Tahun 2010 (Parubak *et al.*, 2023). Menurut hasil penelitian di Kampung Bugis, Papua Barat, menunjukkan bahwa kadar Cd sebesar 0,01 mg/L menjadi nilai yang sudah melewati batas aman untuk konsumsi (Parubak *et al.*, 2023). Kondisi serupa dapat terjadi di kawasan Rawa Pening yang memiliki aktivitas antropogenik tinggi dan pola penggunaan air tanah yang mirip, sehingga kajian terhadap logam berat menjadi sangat penting dilakukan.

Kualitas perairan Danau Rawa Pening mengalami penurunan yang cukup serius akibat akumulasi berbagai jenis limbah yang masuk dari daerah tangkapan air di sekitarnya. Berdasarkan hasil penelitian sebelumnya, status mutu air danau ini telah termasuk dalam kategori tercemar berat menurut metode STORET, dengan delapan parameter melebihi ambang batas baku mutu, salah satunya logam Cd. Konsentrasi Cd di perairan Rawa Pening tercatat antara 0,01–0,02 mg/L (Piranti *et al.*, 2018). Sumber utama pencemar berasal dari aliran sungai yang bermuara ke danau, membawa material erosi, sisa pupuk, dan limbah domestik dari daerah hulu. Selain itu, alih fungsi lahan di daerah tangkapan air (DTA) dari kawasan hutan menjadi lahan pertanian menyebabkan laju erosi meningkat dan mempercepat proses masuknya logam berat ke sistem perairan maupun air tanah (Amalia *et al.*, 2023). Hal ini menunjukkan bahwa penurunan kualitas air Rawa Pening tidak hanya berdampak pada ekosistem perairan, tetapi juga berpotensi memengaruhi kualitas air tanah di sekitarnya.

Pendekatan analisis spasial berbasis Sistem Informasi Geografis (SIG) menjadi metode yang efektif untuk memahami distribusi dan intensitas pencemaran di suatu wilayah. SIG mampu menggambarkan pola penyebaran gulma air seperti eceng gondok di Rawa Pening secara temporal, sehingga hasilnya dapat digunakan untuk mendukung pengambilan keputusan pengelolaan lingkungan (Muna *et al.*, 2025). Pendekatan ini juga relevan diterapkan dalam penelitian sebaran logam berat Cd untuk memperoleh gambaran kuantitatif dan spasial mengenai tingkat pencemaran air tanah. Secara geomorfologis, Rawa Pening terletak di cekungan dengan topografi vulkanik yang menyebabkan arah aliran air tanah bergerak dari lereng gunung menuju dataran rendah. Kondisi ini berpotensi membawa material logam berat dari permukaan ke lapisan akuifer dangkal yang digunakan masyarakat sekitar (Amalia *et al.*, 2023). Oleh karena itu, penelitian mengenai model sebaran logam berat Cd pada air tanah dengan metode interpolasi geospasial sangat diperlukan untuk memetakan zona risiko pencemaran serta menjadi dasar dalam pengelolaan kualitas air tanah secara berkelanjutan di kawasan Rawa Pening.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana tingkat konsentrasi logam berat Kadmium (Cd) pada air tanah di wilayah dataran rendah sekitar Rawa Pening?
2. Bagaimana pola sebaran spasial logam berat Cd pada air tanah di wilayah dataran rendah Rawa Pening jika dianalisis menggunakan pendekatan interpolasi geospasial?
3. Bagaimana keterkaitan antara aktivitas penggunaan lahan dengan potensi pencemaran logam berat Cd pada air tanah di wilayah dataran rendah sekitar Rawa Pening?

1.3 Tujuan

1. Mengidentifikasi kadar logam berat Cd pada air tanah di wilayah dataran rendah sekitar Rawa Pening untuk mengetahui kesesuaiannya dengan baku mutu air tanah.
2. Memetakan dan memodelkan sebaran spasial logam berat Cd menggunakan metode interpolasi geospasial guna menentukan area berisiko pencemaran.

3. Menganalisis keterkaitan antara pola penggunaan lahan dengan distribusi logam berat Cd pada air tanah di wilayah penelitian untuk mengidentifikasi potensi pengaruh aktivitas antropogenik terhadap kualitas air tanah.

1. 4 Manfaat

A. Bagi Ilmu Pengetahuan

1. Penelitian ini dapat menjadi sumber pembelajaran terkait karakteristik kualitas air tanah.
2. Hasil studi ini bermanfaat sebagai referensi awal dan masukan bagi penelitian lanjutan di bidang yang serupa.

B. Bagi Masyarakat

1. Memberikan pemahaman kepada masyarakat mengenai kondisi kualitas air tanah yang dimanfaatkan, serta risiko pencemaran yang dapat mengancam kesehatan dan lingkungan.
2. Membangun hubungan kolaboratif antara mahasiswa dan masyarakat dalam meningkatkan kesadaran lingkungan, serta mendorong penggunaan air tanah secara bijak dan berkelanjutan.

C. Bagi Instansi Pemerintah

1. Menjadi acuan dalam penyusunan kebijakan pengelolaan sumber daya air dan strategi mitigasi pencemaran air tanah, khususnya di wilayah desa yang berada di sekitar Rawa Pening, Kabupaten Semarang, Jawa Tengah.
2. Mendukung pengambilan keputusan melalui data ilmiah dalam menyusun peta risiko pencemaran, perencanaan sistem pengelolaan air tanah, serta pelaksanaan survei atau monitoring kualitas air oleh instansi terkait.

1. 5 Ruang Lingkup

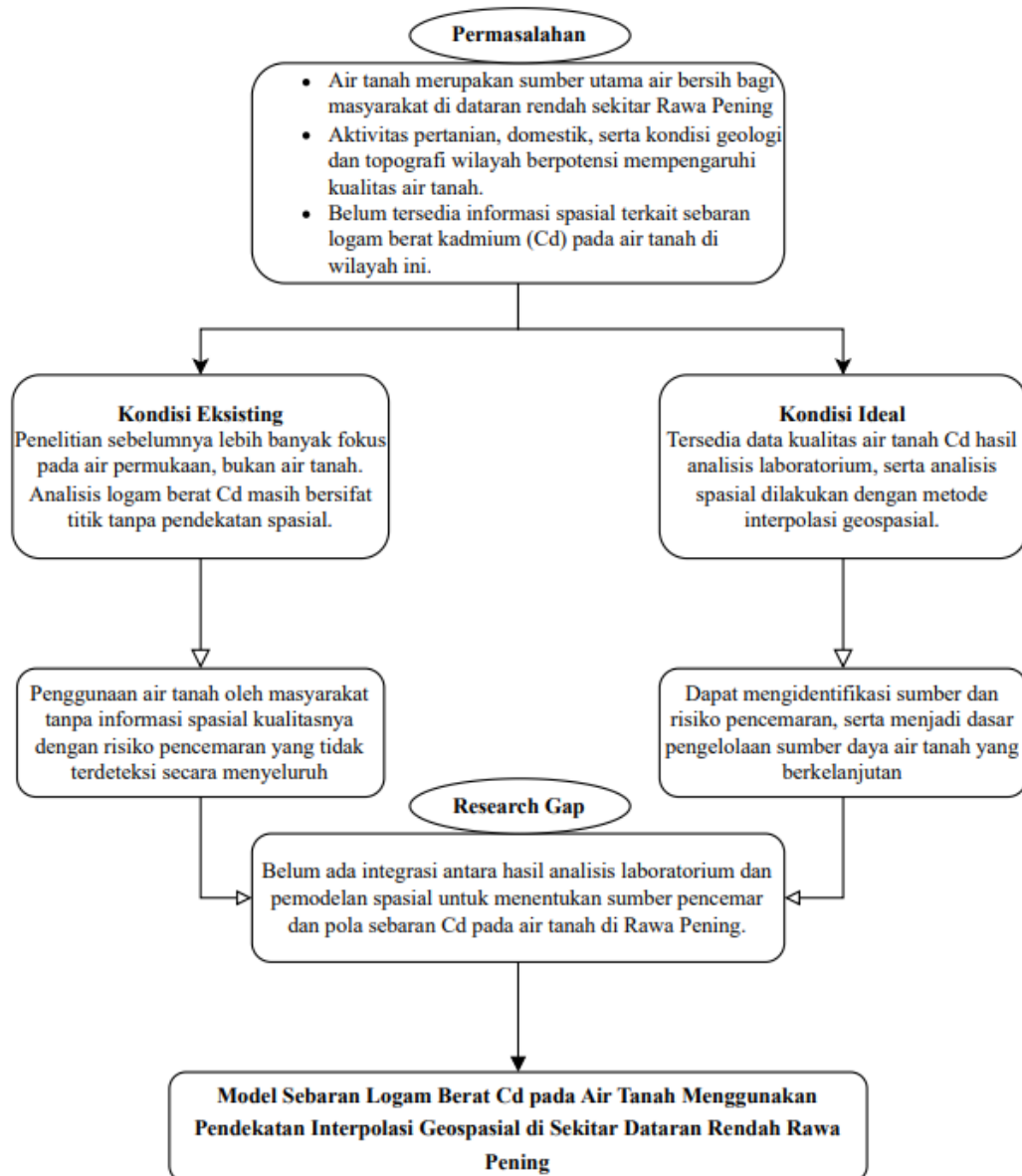
Penelitian ini memiliki ruang lingkup yang menjadi batasan untuk diteliti sebagai berikut:

1. Pengambilan sampel air tanah dilakukan di wilayah desa yang berada pada dataran rendah yang mengelilingi Rawa Pening, Kabupaten Semarang, Jawa Tengah.

2. Parameter kimia air tanah yang dianalisis adalah kandungan kadmium (Cd).
3. Seluruh proses analisis kualitas air tanah dilakukan di Laboratorium Kualitas Air, Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
4. Pengujian terhadap parameter kadmium (Cd) dilakukan dengan mengacu pada standar baku mutu dari Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 Tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 Tentang Kesehatan Lingkungan.
5. Data pendukung dalam penelitian ini mencakup informasi penggunaan lahan, hasil observasi lapangan, serta wawancara.
6. Analisis spasial dilakukan menggunakan metode interpolasi *Inverse Distance Weighting* (IDW) menggunakan perangkat lunak *Geographic information System* (GIS).

1. 6 Kerangka Berpikir

Penelitian ini berangkat dari kondisi di lapangan, di mana air tanah menjadi sumber utama bagi kebutuhan masyarakat sekitar Rawa Pening. Aktivitas pertanian dan domestik yang cukup padat, ditambah dengan karakteristik geologi dan topografi wilayah, berpotensi memengaruhi kualitas air tanah yang digunakan. Hingga kini, informasi spasial mengenai distribusi logam berat kadmium (Cd) di wilayah tersebut masih terbatas, sementara sebagian besar penelitian sebelumnya hanya menyoroti kualitas air permukaan tanpa mengaitkannya dengan data spasial air tanah. Oleh karena itu, penelitian ini mengupayakan integrasi antara hasil uji laboratorium dan analisis spasial menggunakan metode interpolasi geospasial agar dapat menggambarkan sebaran logam berat secara lebih akurat. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat mengidentifikasi sumber serta pola sebaran pencemaran logam berat dan memberikan dasar ilmiah dalam upaya pengelolaan air tanah yang berkelanjutan di kawasan dataran rendah Rawa Pening. Kerangka berpikir penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1. 1 di bawah ini.



Gambar 1. 1 Kerangka Berpikir Penelitian

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Air Tanah

Air tanah merupakan sumber daya alam yang sangat penting untuk kehidupan manusia. Air tanah digunakan sebagai sumber air bersih untuk memenuhi kebutuhan di dalam bidang domestik, pertanian, maupun industri. Air tanah didefinisikan sebagai air yang terdapat dalam batuan atau lapisan tanah di bawah permukaan tanah. Ketersediaan air tanah yang sudah memadai tidak dapat menjamin memiliki kualitas yang baik untuk dikonsumsi. Kondisi kualitas air tanah dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti kondisi geologis, aktivitas antropogenik, dan penggunaan lahan di sekitarnya (Kodoatie & Sjarief, 2021).

Air merupakan satu-satunya zat secara alami yang ada di bumi kita. Selain berfungsi sebagai pelarut dan senyawa kimia yang penting untuk kehidupan manusia, air juga merupakan sumber kehidupan bagi semua makhluk hidup di muka bumi. Fungsi air meliputi mandi, membuat makanan dan minuman, membangun rumah, dan melakukan banyak hal lainnya (Achmad, 2004).

Air tanah diklasifikasikan menjadi 3 jenis, antara lain (Sutrisno, 2002) :

a. Air tanah dangkal

Rentan terhadap pencemaran karena terdapat di atas lapisan yang kedap air. Terbentuknya air tanah dangkal, yang mengandung zat kimia dapat disebabkan oleh proses penyerapan air dari permukaan tanah. Akibatnya, air tanah dangkal merupakan sumber air yang umum digunakan oleh masyarakat.

b. Air tanah dalam

Air yang berada di bawah lapisan batuan yang tidak tembus air atau akuifer. Jika diambil dengan bor, air tanah dalam lebih baik daripada air tanah dangkal karena proses penyaringannya lebih dalam.

c. Mata air

Mata air adalah aliran air tanah yang mengalir keluar dari akuifer menuju permukaan bumi dan digunakan untuk berbagai tujuan. Air tanah ini timbul ke permukaan secara alami.

2.2 Kualitas Air Tanah

Kegiatan manusia dapat mempengaruhi kualitas air tanah yang terdapat di lingkungan. Salah satu faktornya adalah pertumbuhan penduduk yang cepat. Pada situasi ini, pengolaan lingkungan yang baik harus dilakukan. Dalam penelitian ini, kualitas air tanah diuji untuk dua parameter, yaitu kadmium (Cd). Standar baku kualitas air digunakan sebagai acuan untuk menentukan dan memastikan kualitas air agar aman untuk berbagai aktivitas. Berikut adalah persyaratan standar kualitas air dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Baku Mutu Kualitas Air

Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 Tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 Tentang Kesehatan Lingkungan		
Parameter	Satuan	Kadar Maksimum
Kadmium (Cd)	mg/l	0,003

Sumber: Permenkes No. 2 Tahun 2023

2.2.1 Kadmium (Cd)

Logam kadmium (Cd) merupakan logam dengan warna putih perak seperti logam aluminium, tahan terhadap panas dan korosi, lunak, mengkilap, mudah bereaksi, dan tidak terlarut dalam basah. Kadmium umumnya digunakan untuk proses elektrolisis, serta sebagai bahan pigmen dalam industri cat, enamel, dan plastik (Widowati *et al.*, 2008). Kadmium (Cd) menjadi salah satu logam *non esensial* yang tidak dibutuhkan untuk tubuh manusia, justru lebih mengarah racun untuk tubuh (Hidayah *et al.*, 2014). Kadmium dapat berasal dari kegiatan industri, seperti industri alloy dan pemurnian Zn. Kadmium juga dapat berasal dari beberapa sumber lain seperti aktivitas gunung berapi, pertambangan, limbah rumah tangga, dan limbah pertanian (Piranti *et al.*, 2018).

Penggunaan pupuk fosfat untuk aktivitas pertanian dapat meningkatkan konsentrasi Cd di dalam air tanah (Widowati, 2008). Kadmium menjadi salah satu logam berat yang memiliki risiko tinggi terhadap pembuluh darah. Kadmium dapat berpengaruh terhadap manusia dalam jangka waktu panjang dan terakumulasi di dalam ginjal dan hati (Palar, 2004). Beberapa gejala yang dapat ditimbulkan dari kadmium jika masuk ke dalam tubuh, seperti gejala akut sakit kepala, kerongkongan kering, serta sesak nafas bisa menjadi radang paru-paru. Adapun

gejala kronis yang dapat timbul seperti nafas pendek, indera penciuman dan berat badan yang menurun, serta sakit gigi dan berwarna kuning (Sudarmaji *et al.*, 2006).

2.3 Sistem Informasi Geografis (SIG)

Bidang penelitian ilmu dan teknologi yang berkembang dengan cepat dikenal sebagai Sistem Informasi Geografis (SIG). SIG biasanya merupakan sistem berbasis komputer yang digunakan untuk mengumpulkan, mengolah, menganalisa, serta menampilkan data dan informasi tentang lokasinya di permukaan bumi. Data vektor atau raster diperlukan untuk analisis spasial. Akibatnya, proses interpolasi perlu dilakukan untuk menghasilkan nilai di antara titik sampel (Rafsanjani, 2021).

Interpolasi adalah teknik untuk mengestimasi dan menghasilkan data baru yang relevan dan tidak diketahui sebelumnya dengan menggunakan informasi data yang sudah diketahui sebelumnya. Interpolasi dalam pemetaan merupakan proses estimasi nilai pada lokasi yang tidak memiliki data pengukuran langsung, sehingga memungkinkan pembuatan peta atau sebaran nilai pada seluruh wilayah studi (Hadi, 2013). Terdapat 4 metode interpolasi spasial yang biasanya digunakan, antara lain:

2.3.1 *Inverse Distance Weighting (IDW)*

Teknik interpolasi deterministik yang sederhana, di mana perhitungan dilakukan dengan mengkaji kedekatan titik data di sekitarnya. Prinsip dasarnya menyatakan bahwa nilai interpolasi akan lebih menyerupai titik data yang berada lebih dekat dibandingkan yang lebih jauh. Kelebihan dari metode ini adalah metode interpolasi deterministik yang sederhana. Parameter kekuatan metode ini mempengaruhi hasil interpolasi. Nilai kekuatan yang lebih tinggi mengarah pada hasil yang lebih dekat dengan metode terdekat, yang hanya memperhitungkan titik data terdekat. Nilai bobot, atau berat, dihitung berdasarkan jarak antara titik estimasi dan titik data tanpa dipengaruhi oleh distribusi spasial data (Pramono, 2008).

2.3.2 *Kriging*

Metode *Kriging* merupakan teknik interpolasi spasial yang digunakan untuk memperkirakan nilai di lokasi yang tidak memiliki data pengukuran, dengan mengandalkan informasi dari titik-titik di sekitarnya yang telah diukur. Mirip

dengan pendekatan estimasi berbobot seperti IDW, metode ini menerapkan kombinasi linier berbobot, namun tidak hanya mempertimbangkan jarak, tetapi juga pola distribusi dan hubungan spasial antar titik data (ESRI, 2011). Salah satu kelebihan utama *Kriging* adalah kemampuannya dalam memanfaatkan korelasi spasial untuk memberikan hasil yang lebih representatif, sekaligus memperkirakan tingkat ketidakpastian dari estimasi tersebut. Bahkan dalam kondisi data yang menunjukkan korelasi spasial rendah, metode ini tetap dapat digunakan secara efektif (Melliana, 2023).

2.3.3 *Natural Neighbor*

Metode *Natural Neighbor* atau interpolasi tetangga alami merupakan metode interpolasi yang bekerja dengan cara mengidentifikasi titik-titik terdekat dari lokasi yang ingin diprediksi, lalu memberikan bobot pada titik-titik tersebut berdasarkan kedekatannya. Metode ini juga dikenal sebagai interpolasi *Sibson* atau *area-stealing*. Keunggulan utama teknik ini adalah bersifat lokal, karena hanya mempertimbangkan data di sekitar titik prediksi tanpa melibatkan seluruh dataset (Melliana, 2023).

2.3.4 *Spline*

Metode *Spline* adalah pendekatan matematis yang digunakan untuk menghasilkan permukaan interpolasi yang halus dengan meminimalkan tingkat kelengkungan keseluruhan permukaan. Teknik ini memungkinkan perhitungan nilai yang berada di luar rentang nilai minimum dan maksimum data awal, dengan memanfaatkan fungsi peregangan (Hamdi & Kurniawan, 2018). *Spline* sering digunakan untuk menggambarkan permukaan distribusi kontinu seperti konsentrasi polusi udara, elevasi tanah, maupun permukaan air. Keunggulannya terletak pada kemampuannya menghasilkan estimasi yang cukup akurat meski menggunakan jumlah data yang terbatas. Namun, keakuratan metode ini dapat menurun apabila terdapat perbedaan nilai yang sangat tajam antar titik yang berdekatan (Melliana, 2023).

Dari empat metode interpolasi yang sering dipakai di Sistem Informasi Geografis (SIG), seperti IDW, *Kriging*, *Natural Neighbor*, dan *Spline*, penelitian ini akhirnya memilih *Inverse Distance Weighting* (IDW). Alasan utamanya adalah kemampuan metode ini untuk menghasilkan interpolasi yang cukup baik pada data

spasial yang titik-titiknya tidak terlalu padat. Selain itu, IDW punya kelebihan dalam menjelaskan hubungan antara tingkat konsentrasi logam berat dan jarak di antara titik sampling dengan pendekatan matematis yang simpel tapi tetap akurat. Jadi, metode IDW dianggap paling pas untuk mengkaji sebaran spasial logam berat Cd di air tanah di dataran rendah Rawa Pening.

2.4 Penelitian Terdahulu

Penulis menggunakan penelitian sebelumnya sebagai acuan untuk mendapatkan teori-teori yang berguna dalam penelitian ini. Penelitian sebelumnya ditunjukkan dalam Tabel 2.2 di bawah ini, yang relevan atau berkaitan dengan penelitian penulis.

Tabel 2. 2 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti	Judul Penelitian	Metode Penelitian	Kesimpulan
1	Muhammad Al Khuwarizmi (2023)	Analisis Sebaran Logam Berat Pada Air Tanah Menggunakan Metode <i>Inverse Distance Weighting</i> (IDW) di Ngaglik, Kabupaten Sleman, Daerah Istimewa Yogyakarta	Analisis laboratorium menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom (SSA) dan pemodelan spasial metode IDW	Ditemukan kandungan Pb melebihi baku mutu dengan sebaran dipengaruhi oleh tata guna lahan dan kondisi akuifer. Metode IDW efektif menggambarkan variasi spasial logam berat di air tanah.
2	Dhandhun Wacano, Nedhia Febrianti,	Analisis Konsentrasi dan Distribusi Spasial Logam	Analisis spasial menggunakan GIS dengan metode	Hasil menunjukkan Cd melebihi baku mutu di

	dan Lutfia Isna Ardhayanti (2025)	Berat Dalam Air Tanah di Sub DAS Galeh-Torong, Jawa Tengah, Indonesia	interpolasi IDW dan uji laboratorium parameter logam berat (Cd, Pb, Cu, Fe)	beberapa titik industri. Sebaran logam berat dipengaruhi oleh aktivitas Industri, kondisi geologi, dan jarak terhadap sumber limbah. Pemodelan spasial dapat memetakan wilayah berisiko dengan baik.
3	Auniatul Aulia (2022)	Distribusi Spasial Logam Pada Air Tanah Dengan Metode Perbandingan interpolasi di Daerah Kontaminasi Air Asam Kawah Ijen Situbondo, Jawa Timur	Pengambilan sampel air tanah di sekitar TPA dan analisis spasial menggunakan <i>Inverse Distance Weighting</i> (IDW)	Kadar logam berat tertinggi ditemukan pada area dekat TPA. Model IDW mampu menunjukkan zona risiko tinggi dan hubungan antara sumber pencemar dengan aliran air tanah.
4	Arjuna Rifqi Sandyatama	Analisis Sebaran Kandungan Logam Berat Cr,	Pengambilan sampel sumur warga; analisis ICP-MS;	Kualitas air tanah bervariasi dari penggunaan air rendah

	.Hibatullah (2022)	Mn, Dan Pb Pada Air Tanah di Sekitar Tpa Piyungan Menggunakan Pemodelan IDW	pemodelan dan analisis spasial IDW	hingga sedang; rekomendasi penggunaan air tanah untuk irigasi tergantung pada tingkat pembatasan penggunaan air.
5	Taufiqur Rahman Pristiyanto (2019)	Analisis Kandungan Logam Berat (Fe, Cd, Cu, Zn, Pb Dan Mn) Pada Airtanah dan Potensi Risiko Lingkungan di Kecamatan Asembagus Situbondo	Pengambilan sampel berdasarkan SNI; analisis AAS; analisis risiko kesehatan	Kandungan kadmium (Cd) melebihi ambang batas di sejumlah titik. Aktivitas pertanian dan pembuangan limbah diduga menjadi penyebab utama peningkatan kadar pencemar dalam air tanah.

BAB III

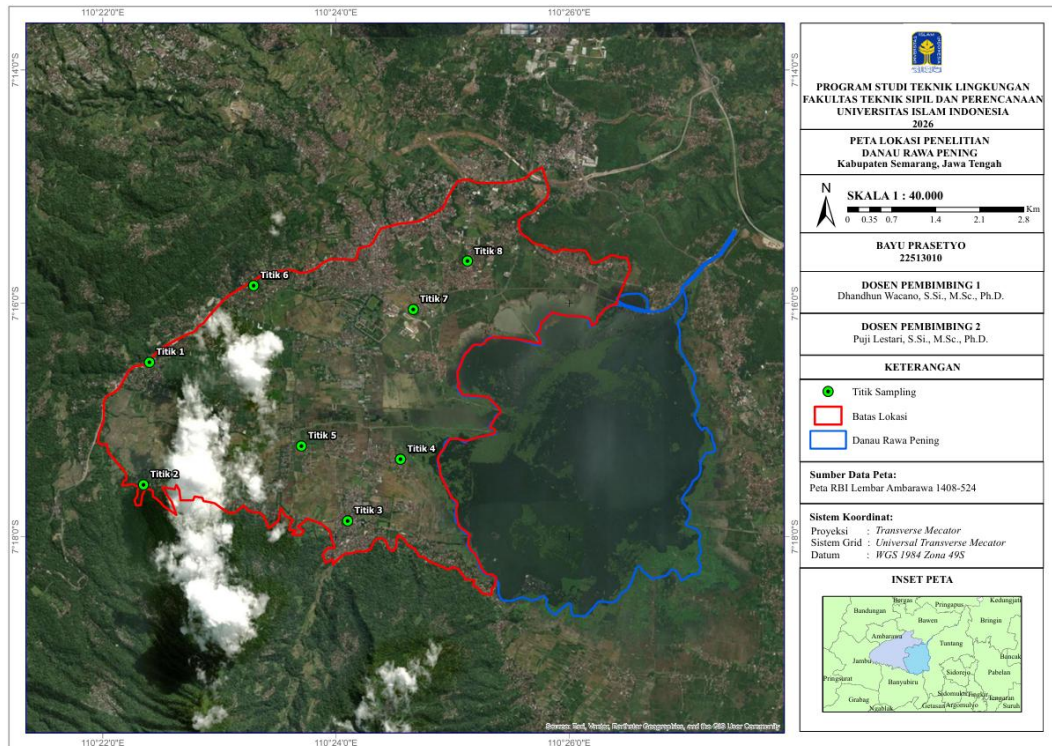
METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Desember 2025 – Mei 2026. Lokasi penelitian terletak di dataran rendah dan area pertanian sekitar Danau Rawa Pening, Kabupaten Semarang, Jawa Tengah. Secara geografis, danau ini terletak di antara Kecamatan Ambarawa, Bawen, Jambu, dan Banyubiru. Titik sampel yang diambil berjumlah 8 titik yang dilanjutkan dengan pengujian kandungan logam Cd di Laboratorium Kualitas Lingkungan, Prodi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan. Berikut merupakan Tabel 3.1 yang menunjukkan titik koordinat pada setiap titik sampel, serta Gambar 3.1 yang menunjukkan peta lokasi penelitian.

Tabel 3. 1 Titik Koordinat Penelitian

Titik Sampel	Titik Koordinat	
	Lat	Long
S1	-7.275095°	110.373361°
S2	-7.292561°	110.372507°
S3	-7.297729°	110.401694°
S4	-7.288953°	110.409240°
S5	-7.287053°	110.395076°
S6	-7.264163°	110.388241°
S7	-7.267536°	110.411058°
S8	-7.260660°	110.418822°



Gambar 3. 1 Peta Lokasi Titik Sampling

Pada Tabel 3.1 dan Gambar 3.1 memperlihatkan titik koordinat dan persebaran lokasi titik sampling, serta batas lokasi dan Danau Rawa Pening yang menjadi wilayah penelitian. Wilayah tersebut dipilih karena memiliki dataran yang rendah di sekitar Rawa Pening dan aktivitas antropogenik tinggi, seperti aktivitas pertanian dan permukiman masyarakat yang memanfaatkan air tanah sebagai sumber utama kebutuhan domestik. Penentuan lokasi ini diharapkan mampu memberikan gambaran empiris mengenai hubungan antara aktivitas lahan dan potensi pencemaran logam berat Cd di wilayah dataran rendah sekitar Danau Rawa Pening.

3.2 Alat dan Bahan

Alat Pengambilan sampel air tanah dan pengujian parameter kualitas air mengacu pada standar nasional yang berlaku. Berikut ini merupakan daftar alat dan bahan yang digunakan.

3.2.1 Perangkat Penelitian

A. Perangkat keras

1. Laptop
2. *Handphone Android*

B. Perangkat Lunak

1. *ArcGIS Pro 3.4.0*
2. *Google Earth Pro*
3. *Microsoft Excel*
4. *Microsoft Word*

3.2.2 Pengambilan Sampel

A. Alat

1. Alat tulis
2. *Coolbox*
3. Botol sampel
4. Gayung
5. Ember

B. Bahan

1. Aquades
2. Kertas pH
3. Tisu
4. Sarung tangan
5. Label

3.2.3 Pengujian Kadmium (Cd)

A. Alat

1. *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)*
2. Gelas piala
3. Pipet ukur
4. Labu ukur
5. Corong gelas
6. Pemanas listrik
7. Kertas saring whatman 40
8. Labu semprot

B. Bahan

1. Sampel air
2. Air suling
3. Asam nitrat (HNO_3)
4. Larutan standar kadmium (Cd)

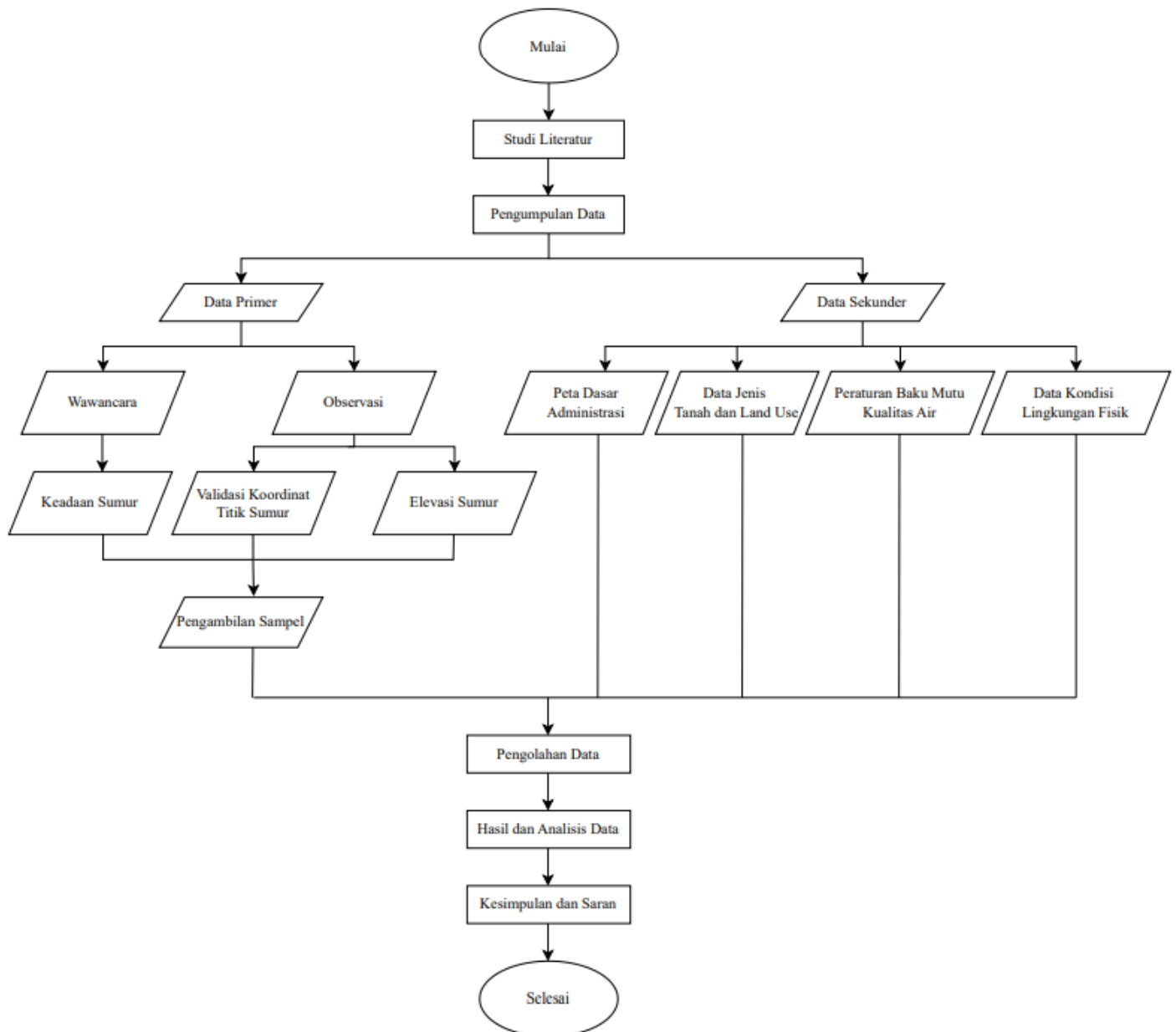
5. Gas asetilen (C_2H_2)

3.3 Prosedur Analisis Data

Diagram di bawah ini menunjukkan bagaimana penelitian ini dilakukan, dengan proses penelitian yang terdiri dari beberapa tahap penelitian.

3.3.1 Tahapan Penelitian

Diagram alir yang menunjukkan tahapan penelitian dapat dilihat pada Gambar 3.2 di bawah ini.



Gambar 3. 2 Diagram Alir Penelitian

Berdasarkan Gambar 3.2 tersebut, penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk memahami kondisi kualitas air tanah serta potensi pencemaran logam berat di kawasan dataran rendah Rawa Pening. Tahapan berikutnya mencakup pengumpulan data primer melalui wawancara, observasi, serta pengambilan titik koordinat dan elevasi sumur warga. Data sekunder yang digunakan meliputi peta dasar, jenis tanah, penggunaan lahan, dan peraturan baku mutu air tanah. Seluruh data kemudian diolah menggunakan metode interpolasi geospasial untuk memetakan sebaran logam berat Cd.

3.3.2 Pengumpulan Data

Data primer dan sekunder adalah bagian dari pengumpulan data. Interaksi masyarakat lokal, survei lapangan, serta pengambilan sampel air tanah dari sumur warga adalah sumber data primer. Sedangkan data sekunder terdiri dari dokumen, peta, dan peraturan instansi terkait. Pengumpulan data bertujuan untuk mendapatkan data kimiawi dan spasial yang akurat tentang kondisi air tanah di daerah sekitar Rawa Pening. Proses ini sangat penting untuk mendukung analisis yang dilakukan oleh metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) dalam SIG.

1. Data Primer

Wawancara dan observasi lapangan menjadi metode yang digunakan sebagai metode untuk mengumpulkan data primer untuk penelitian ini. Wawancara dapat dilakukan secara langsung kepada perangkat desa, pemilik sumur, dan warga lainnya untuk mendapatkan informasi teknis yang diperlukan untuk kebutuhan penelitian. Data tersebut dapat berupa usia, kedalaman, cara mengambil sumber air tanah, serta aktivitas yang dilakukan masyarakat di sekitar. Wawancara juga dapat membantu dalam memberikan hubungan antara hasil uji laboratorium menggunakan parameter kimia dengan kondisi sumur.

Observasi dapat mencakup kondisi sanitasi, lahan pertanian, keberadaan septik tank, dan potensi sumber pencemar lainnya. Dengan menilai risiko kontaminasi yang mungkin secara visual, observasi ini bertujuan untuk mendukung analisis spasial. Alat GPS juga digunakan untuk mengukur titik koordinat setiap sumur dan dimasukkan ke dalam perangkat lunak SIG. Dalam proses interpolasi spasial menggunakan metode IDW, validasi titik koordinat ini sangat penting. GPS juga dapat

digunakan untuk mengukur elevasi. Elevasi dapat memengaruhi pola pergerakan air tanah, serta mengetahui hubungan antara kontaminasi parameter kimia dengan posisi sumber air tanah.

Pengambilan sampel air dilakukan terhadap air tanah yang berasal dari sumur warga yang telah ditentukan saat tahap survei dengan mempertimbangkan juga spasial wilayah penelitian. Sampel yang diambil akan dimasukkan ke dalam botol sampel agar tersimpan dengan baik dan menghindari kontaminasi. Botol sampel diberikan label sesuai titik koordinat lokasi sumur warga, lalu disimpan ke dalam *coolbox*. Selama menguji kadar Cd sampel air, digunakan metode ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) berdasarkan SNI pengujian sampel. Langkah ini menjadi penting untuk memastikan hasil yang didapatkan menggambarkan kondisi kualitas air tanah yang *real* di dataran rendah sekitar Rawa Pening.

Pengukuran parameter in-situ dilakukan menggunakan *Horiba U-50 Multiparameter Water Quality Meter* untuk memperoleh kondisi fisik-kimia air tanah secara langsung di lapangan. Parameter yang diukur meliputi pH, suhu, TDS, dan EC, yang memiliki keterkaitan erat dengan perilaku logam berat Kadmium (Cd) dalam media air tanah. Nilai pH memengaruhi bentuk spesiasi dan kelarutan Cd, suhu berpengaruh terhadap laju difusi ion logam, EC mencerminkan tingkat ionisasi yang berkorelasi dengan konsentrasi ion logam terlarut, sedangkan TDS menunjukkan total zat terlarut dan mendukung interpretasi EC. Data *in situ* ini digunakan untuk memperkuat interpretasi hubungan antara kondisi hidrogeokimia lingkungan dengan distribusi spasial Cd di kawasan dataran rendah Rawa Pening.

2. Data Sekunder

Data sekunder berasal dari sumber resmi, seperti lembaga pengelola lingkungan, pemerintah daerah, dan publikasi ilmiah. Salah satu data penting yang digunakan adalah peta dasar administrasi daerah di sekitar Rawa Pening, yang digunakan untuk membangun kerangka spasial pemetaan kualitas air tanah. Informasi jenis tanah dan penggunaan lahan juga dikumpulkan untuk menggambarkan hasil interpolasi spasial, serta

mempelajari hubungan antara sifat fisik tanah dan penggunaan lahan di daerah tersebut dengan daya filtrasi dan potensi pencemaran air tanah.

Data sekunder lain yang digunakan adalah peraturan baku mutu kualitas air tanah. Peraturan ini digunakan sebagai nilai ambang batas untuk mengukur hasil pengujian setiap parameter agar tetap berada di bawah ambang batas yang diperbolehkan. Selain itu, data kondisi lingkungan fisik seperti hidrogeologi dan geologi wilayah juga diperlukan sebagai komponen yang mendukung analisis faktor lingkungan terhadap sebaran logam berat di dalam air tanah. Dengan mengintegrasikan data primer dan sekunder, diharapkan hasil penelitian akan menggambarkan secara lengkap dan akurat tentang kondisi kualitas air tanah di daerah dataran rendah sekitar Rawa Pening. Selain itu, data tersebut digunakan untuk meningkatkan validitas hasil uji laboratorium dan spasial yang didapatkan.

3. *Quality Assurance dan Quality Control (QA QC)*

Pengendalian mutu dalam penelitian ini dilakukan untuk menjamin keandalan dan validitas hasil analisis kadar Kadmium (Cd) pada air tanah. Prosedur QA/QC mengacu pada SNI 6989-84:2019 Air dan air limbah - Bagian 84 : Cara uji kadar logam terlarut dan logam total secara Spektrometri Serapan Atom (SSA)-nyala, yang diterapkan secara sistematis mulai dari pengambilan sampel hingga analisis laboratorium. Pengujian dilakukan di Laboratorium Kualitas Air, Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia.

a. *Quality Assurance (QA)*

Quality Assurance (QA) difokuskan pada penjaminan kualitas proses analisis agar hasil yang diperoleh akurat dan representatif. Kalibrasi alat dilakukan menggunakan larutan standar Cd dengan rentang 0,001-2,0 mg/L untuk memastikan linearitas kurva kalibrasi ($r \geq 0,995$). Semua alat ukur telah dikalibrasi dan digunakan oleh analis berkompeten. Sampel air tanah sebanyak delapan titik disimpan dalam suhu 4°C, diawetkan dengan HNO₃ pekat hingga pH < 2, dan dianalisis maksimal 24 jam setelah pengambilan. Setiap tahapan analisis dicatat dalam *logbook* sebagai bagian dari dokumentasi dan validasi mutu data.

b. *Quality Control* (QC)

Quality Control (QC) diterapkan untuk mengendalikan ketepatan hasil dan mendeteksi potensi kontaminasi. Analisis blanko dilakukan dengan frekuensi 5–10% per batch untuk memastikan tidak ada gangguan eksternal, sedangkan analisis duplo dilakukan pada sebagian sampel dengan batas *Relative Percent Difference* (RPD) $\leq 10\%$. Jika nilai RPD melebihi batas tersebut, analisis diulang hingga memenuhi kriteria. Uji akurasi (*spike recovery*) dilakukan dengan menambahkan larutan standar Cd pada sampel, dengan kisaran nilai pemulihan 85–115% untuk *spike matrix* dan 90–110% untuk standar kerja.

c. Validasi Hasil

Validasi akhir hasil analisis ditetapkan apabila memenuhi empat parameter utama, yaitu koefisien korelasi kalibrasi $\geq 0,995$, nilai RPD $\leq 10\%$, hasil blanko $< 0,001$ mg/L, dan persentase pemulihan dalam rentang yang ditentukan. Penerapan QA/QC ini memastikan bahwa data yang diperoleh memiliki akurasi, presisi, dan reliabilitas tinggi, sehingga dapat digunakan secara ilmiah untuk menganalisis distribusi spasial logam berat Cd menggunakan metode interpolasi geospasial (IDW) di dataran rendah sekitar Rawa Pening.

4. Penentuan Jumlah dan Lokasi Titik Sampling

Penentuan titik sampling dilakukan menggunakan metode *purposive sampling* dengan mempertimbangkan tujuan penelitian, kondisi lingkungan, dan karakteristik wilayah studi. Metode ini dipilih agar titik pengamatan mampu mewakili variasi penggunaan lahan, potensi sumber pencemar, serta kondisi air tanah pada kawasan dataran rendah di sekitar Rawa Pening. Pemilihan jumlah titik dilakukan berdasarkan ketersediaan sumur yang memenuhi kriteria penelitian, keterwakilan spasial wilayah, aksesibilitas lokasi, kebutuhan analisis laboratorium, serta keterbatasan penelitian. Titik sampling didistribusikan pada berbagai kondisi lingkungan yang berbeda, meliputi kawasan permukiman, area pertanian, lokasi yang berdekatan dengan Danau Rawa Pening, serta lokasi yang memiliki potensi sumber pencemar seperti penggunaan pupuk, *septic tank* dan aktivitas domestik masyarakat.

Kualitas hasil interpolasi IDW tidak hanya dipengaruhi oleh jumlah sampel, tetapi juga oleh persebaran dan kerapatan titik sampel pada wilayah penelitian. Oleh karena itu, pemilihan titik pada penelitian ini difokuskan pada keterwakilan spasial setiap bagian wilayah studi sehingga mampu menggambarkan variasi kondisi lingkungan yang ada. Persebaran titik sampling juga dirancang untuk mewakili bagian-bagian dari kawasan penelitian untuk mengurangi konsentrasi titik pada satu lokasi tertentu dan meningkatkan representativitas data (Yudanegara *et al.*, 2021).

Meskipun jumlah titik sampling relatif terbatas, seluruh titik telah dipilih untuk merepresentasikan kondisi lingkungan utama yang diduga berpengaruh terhadap distribusi kadmium (Cd). Oleh karena itu, hasil interpolasi dalam penelitian ini digunakan sebagai pemetaan spasial awal (*preliminary spatial assessment*) untuk mengidentifikasi pola distribusi dan zona yang berpotensi memiliki konsentrasi Cd lebih tinggi dibandingkan wilayah lainnya. Keandalan model interpolasi selanjutnya dievaluasi menggunakan metode *cross validation*. Evaluasi ini dilakukan untuk menilai kemampuan prediksi model IDW melalui perbandingan antara nilai hasil prediksi dan nilai pengamatan sehingga interpretasi hasil tidak hanya didasarkan pada jumlah titik sampling, tetapi juga pada performa statistik model yang diperoleh.

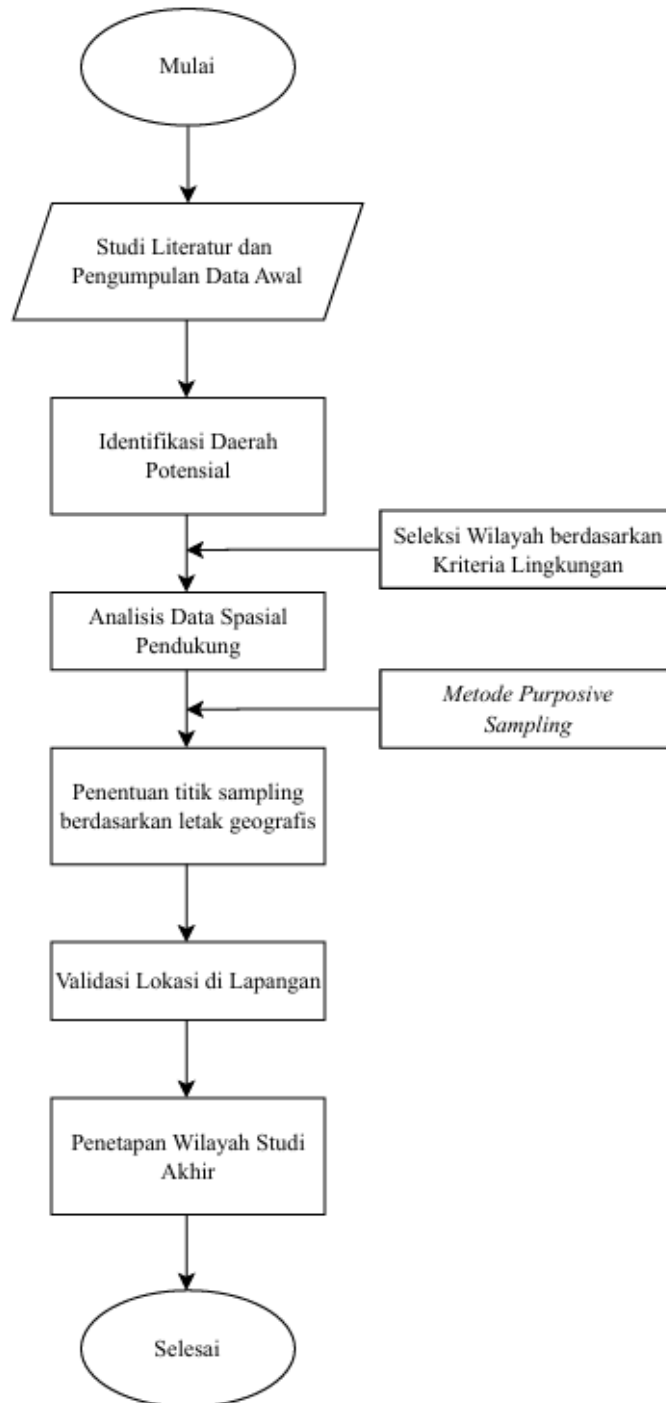
3.3.3 Pengolahan Analisis Data

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif. Analisis ini diambil dari data yang dikumpulkan tanpa menggunakan perhitungan atau statistik. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui faktor lingkungan seperti permukiman dan lahan pertanian yang dapat mempengaruhi kualitas air tanah di Rawa Pening. Data dikumpulkan dengan metode primer dan sekunder dan kemudian dianalisis secara spasial untuk memungkinkan penjelasan yang mudah dimengerti.

1. Analisis Penentuan Wilayah Studi

Penentuan wilayah studi pada penelitian ini dibuat berdasarkan studi literatur dan pengumpulan data awal untuk selanjutnya mengidentifikasi daerah potensial untuk diteliti. Dataran rendah sekitar Rawa Pening dipilih dengan mempertimbangkan keberadaan sumber air tanah yang berada di

dekat danau, banyaknya aktivitas pertanian, rumah tangga dan pariwisata, serta persebaran sumber air tanah yang dimiliki warga yang memungkinkan untuk pengambilan data primer secara langsung. Selain itu, kondisi geohidrologi di wilayah ini juga memungkinkan untuk analisis spasial yang representatif terhadap kualitas air tanah berdasarkan parameter kimia yang digunakan. Berikut diagram alir analisis penentuan wilayah studi ditunjukkan pada Gambar 3.3 di bawah ini.

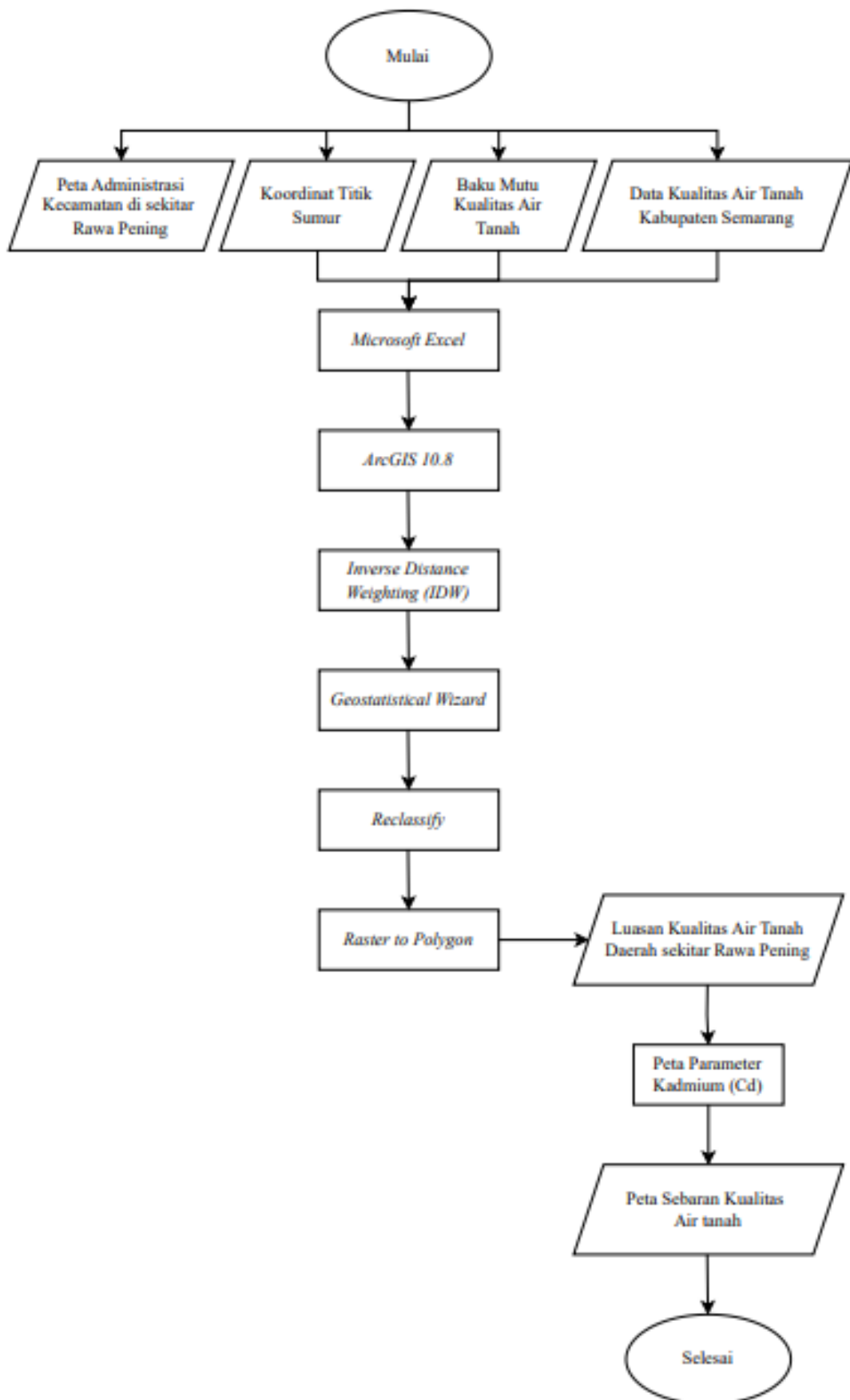


Gambar 3. 3 Diagram Alir Analisis Penentuan Wilayah Studi

Pada Gambar 3.3 menunjukkan tahapan analisis penentuan wilayah studi yang dimulai dengan studi literatur dan pengumpulan data awal untuk mengidentifikasi area potensial di sekitar dataran rendah Rawa Pening yang memiliki karakteristik geologi dan penggunaan lahan bervariasi. Tahap selanjutnya adalah seleksi wilayah berdasarkan kriteria lingkungan, seperti kedekatan dengan sumber pencemar, arah aliran air tanah, serta ketersediaan sumur warga sebagai sumber data primer. Titik sampling ditentukan secara purposive sampling agar distribusinya merata secara spasial dan mampu mewakili variasi kondisi geografis, penggunaan lahan, serta aktivitas masyarakat di sekitar wilayah penelitian. Validasi lapangan kemudian dilakukan untuk memastikan setiap titik sesuai dengan kondisi aktual, sehingga wilayah studi akhir yang ditetapkan dapat merepresentasikan pola sebaran logam berat Cd secara akurat.

2. Analisis Data Kualitas Air tanah dengan *Inverse Distance Weighting* (IDW)

Metode ini memiliki keunggulan dalam memprediksi nilai di lokasi yang tidak terukur berdasarkan bobot jarak dari titik sampling terdekat, sehingga semakin dekat lokasi terhadap titik data, maka semakin besar pengaruh nilainya. Metode ini paling efektif diterapkan ketika jumlah titik data yang dianalisis berada pada kisaran 14 titik (Yasrebi dkk., 2009). Penggunaan metode ini bertujuan untuk memperoleh gambaran visual persebaran spasial parameter kualitas air tanah, serta luasan wilayah yang termasuk dalam setiap kategori kualitas berdasarkan baku mutu yang berlaku. Berikut dapat dilihat diagram alir analisis kualitas air tanah dengan metode IDW (Gambar 3.4).



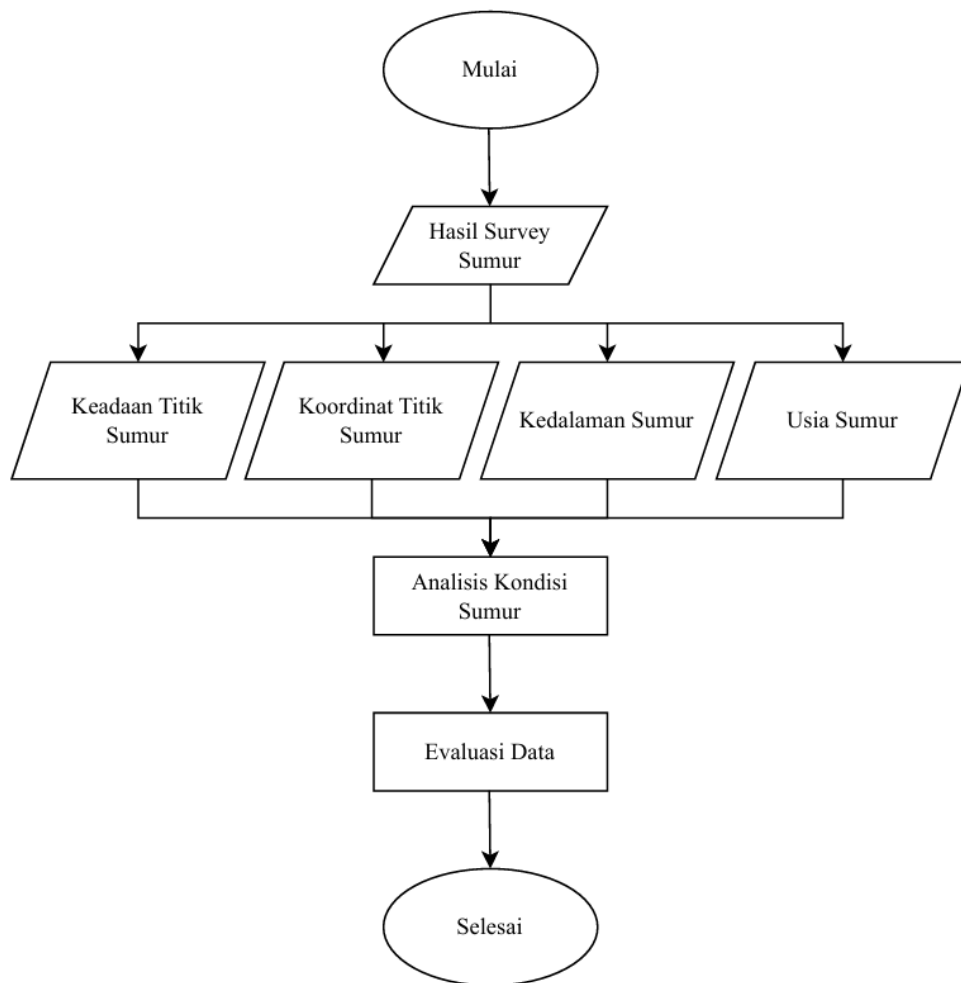
Gambar 3. 4 Diagram Alir Analisis Data Kualitas Air tanah dengan IDW

Tahapan analisis yang ditunjukkan Gambar 3.4 dimulai dari pengumpulan data spasial, seperti koordinat titik sumur, peta dasar administratif, dan nilai parameter kimia air tanah seperti Cd. Data tersebut diolah menggunakan perangkat lunak *ArcGIS 10.8*. Pengolahan data dilakukan dengan fitur *Geostatistical Wizard*, dengan pengaturan parameter seperti *power = 2*, *sector type*, serta proses *cross validation* untuk menguji konsistensi spasial dari hasil interpolasi. Penyesuaian ini dilakukan agar hasil interpolasi akurat secara visual dan memiliki validitas ilmiah dalam permodelan sebaran spasial.

Hasil dari proses interpolasi IDW akan diekspor dalam bentuk peta raster yang menunjukkan nilai spasial masing-masing parameter kualitas air tanah. Selanjutnya, menyesuaikan hasil interpolasi dengan pembagian wilayah administratif dan sebaran titik sampling, serta proses *reclassify* untuk mengelompokkan nilai parameter ke dalam baku mutu kualitas air tanah yang ditetapkan. Terakhir, menyajikan hasil pemetaan sebaran parameter kualitas air tanah dalam bentuk peta dan tabel statistik. Dengan pendekatan ini, hasil analisis dapat menggambarkan distribusi spasial secara visual, serta sebagai informasi kuantitatif untuk bahan pertimbangan dalam pengambilan keputusan dan evaluasi kebijakan lingkungan.

3. Analisis Data Hasil Survei

Analisis data hasil survei dilakukan berdasarkan informasi yang diperoleh melalui observasi langsung dan wawancara terhadap pengguna air tanah di sekitar Rawa Pening. Dapat dilihat diagram alir analisis data hasil survei Gambar 3.5 sebagai berikut.



Gambar 3. 5 Diagram Alir Analisis Data Hasil Survei

Gambar 3.5 menunjukkan proses analisis data yang dikumpulkan meliputi keadaan fisik sumber air, koordinat titik lokasi, kedalaman, serta usia sumber air tanah, yang kemudian dicatat secara sistematis untuk mempermudah proses pengolahan data. Informasi spasial seperti koordinat dan kedalaman digunakan dalam proses interpolasi spasial menggunakan metode IDW, sementara variabel lain digunakan untuk mengkaji kemungkinan pengaruh lingkungan terhadap kualitas air tanah. Proses reduksi data dilakukan dengan merangkum hasil survei dan menyusunnya dalam bentuk tabel serta klasifikasi wilayah.

Tahap selanjutnya adalah menganalisis kondisi sumber air tanah berdasarkan kombinasi antara data lapangan dan hasil uji laboratorium parameter Cd. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan kualitas fisik sumber air terhadap kadar parameter kimia yang diuji, serta menafsirkan pola sebaran spasialnya melalui peta hasil interpolasi. Penyajian data

dilakukan secara deskriptif dan visual untuk mempermudah interpretasi hasil. Hasil akhir dari analisis ini akan memberikan gambaran awal mengenai sumber pencemar dan wilayah dataran rendah dengan tingkat kerentanan terhadap pencemaran air tanah di sekitar Rawa Pening.

4. Analisis Data Pendukung

Data penggunaan lahan untuk pertanian dan permukiman dianalisis sebagai data pendukung untuk melihat pengaruh aktivitas permukaan terhadap sebaran kualitas air tanah di sekitar Rawa Pening. Data citra yang digunakan bersumber dari *Google Earth* (Landsat) dan peta administrasi wilayah yang diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama, yaitu bangunan, vegetasi, dan penggunaan lahan (*land use*). Proses klasifikasi dilakukan menggunakan perangkat lunak *ArcGIS 3.4.0* dengan metode digitasi visual berdasarkan interpretasi citra spasial. Hasil klasifikasi ini digunakan untuk mengkaji keterkaitan antara pola pemanfaatan lahan dengan potensi kontaminasi parameter Cd pada setiap titik sampling.

Adapun data utama yang digunakan adalah *Digital Elevation Model* (DEM) dan titik koordinat titik sampling yang telah diperoleh melalui survei lapangan. Proses dilakukan dengan *overlay* peta DEM dan peta lokasi titik sumur dalam *ArcGIS 3.4.0* untuk menghasilkan model aliran air tanah secara spasial. Hasil analisis ini memberikan gambaran mengenai kemungkinan lintasan pergerakan kontaminan dari satu titik ke titik lain yang lebih rendah secara elevasi, yang penting dalam menafsirkan pola sebaran kualitas air tanah secara menyeluruh.

BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN ANALISIS DATA

4.1 Kondisi Wilayah Eksisting

4. 1. 1 Letak dan Administrasi Wilayah

Lokasi penelitian berada di wilayah permukiman dataran rendah sebelah utara hingga barat dari Rawa Pening, Kabupaten Semarang, Jawa Tengah. Wilayah dataran rendah tersebut berdekatan langsung dengan Rawa Pening. Air tanah masih digunakan oleh masyarakat di sekitar lokasi penelitian untuk kebutuhan rumah tangga seperti memasak, mandi, dan mencuci. Oleh karena itu, kualitas air tanah sangat penting untuk diperhatikan, terutama terkait kemungkinan pencemaran logam berat. Berikut merupakan salah satu kondisi eksisting di wilayah penelitian dapat dilihat pada Gambar 4.1 di bawah ini.



Gambar 4. 1 Kondisi Eksisting Wilayah Penelitian

Secara umum, wilayah penelitian memiliki topografi yang relatif datar dengan elevasi rendah. Wilayah yang berdekatan dengan Rawa Pening seperti yang ditunjukkan Gambar 4.1 tersebut juga dapat mempengaruhi kualitas air tanah. Pada saat curah hujan sedang meningkat, dapat mengakibatkan proses infiltrasi berlangsung lebih intensif. Aktivitas manusia yang dilakukan di sekitarnya, seperti pertanian dan rumah tangga juga dapat menimbulkan bahan pencemar yang dapat terakumulasi dan masuk ke dalam air tanah. Selain itu, kedekatan wilayah penelitian dengan kawasan Rawa Pening juga mempengaruhi karakteristik lingkungan dan sistem hidrologi pada wilayah penelitian. Oleh karena itu, kondisi geografis dan administrasi wilayah penelitian menjadi salah satu faktor penting

dalam interpretasi distribusi kualitas air tanah dan konsentrasi kadmium (Cd) pada penelitian ini.

4. 1. 2 Batas dan Cakupan Wilayah Penelitian

Cakupan wilayah penelitian ini meliputi kawasan permukiman dan area pertanian di beberapa lokasi, serta memiliki dataran yang rendah dan dekat dengan badan air Rawa Pening. Penentuan batas wilayah dilakukan untuk membantu dalam proses analisis distribusi spasial dan interpretasi hasil interpolasi agar lebih terstruktur dan hasilnya sesuai dengan kondisi yang ada di lapangan. Wilayah penelitian ini mencakup beberapa kecamatan yang menjadi batas wilayah penelitian dengan luas sebesar 25,94 km². Wilayah ini berbatasan dengan Kecamatan Bawen di sebelah utara, Kecamatan Banyubiru di sebelah selatan, Rawa Pening di sebelah timur, serta Kecamatan Ambarawa dan Kecamatan Jambu di sebelah barat. Berikut Gambar 4.2 menunjukkan kondisi Danau Rawa Pening di lokasi penelitian di bawah ini.



Gambar 4. 2 Rawa Pening

Pada Gambar 4.2 tersebut menunjukkan Rawa Pening yang terdapat di lokasi penelitian. Penelitian yang berfokus pada kawasan permukiman di dataran rendah dengan delapan titik sampling yang tersebar secara spasial di sekitar rawa. Pemilihan titik sampling dilakukan berdasarkan variasi kondisi eksisting, aktivitas masyarakat yang dilakukan di sekitarnya, sehingga diharapkan dapat menggambarkan distribusi spasial konsentrasi logam Cd secara representatif. Selain itu, hasil interpolasi spasial yang dilakukan dapat digunakan untuk mendukung interpretasi kondisi eksisting di wilayah penelitian.

4. 1. 3 Kondisi Fisik dan Hidrogeologi

Wilayah penelitian memiliki karakteristik topografi dataran rendah dengan kondisi permukaan tanah yang relatif landai. Kondisi tersebut menyebabkan proses infiltrasi air permukaan ke dalam tanah berlangsung cukup intensif, terutama pada saat curah hujan tinggi. Selain itu, keberadaan kawasan rawa di sekitar wilayah penelitian juga mempengaruhi sistem hidrologi dan kondisi air tanah di kawasan tersebut. Secara hidrogeologis, wilayah sekitar Rawa Pening didominasi oleh material sedimen seperti lumpur, lempung, pasir halus, dan material organik hasil proses pengendapan dalam waktu yang panjang. Kondisi tersebut dapat mempengaruhi pergerakan air tanah serta kandungan unsur terlarut di dalamnya. Kondisi salah satu sumur yang digunakan sebagai titik pengambilan sampel air yang ditunjukkan pada Gambar 4.3 berikut.



Gambar 4. 3 Kondisi Sumur

Kondisi sumur yang menjadi titik pengambilan sampel air tanah warga mayoritas sudah menggunakan pompa seperti pada Gambar 4.3. Pada beberapa lokasi penelitian, kedalaman sumur yang berbeda juga diduga mempengaruhi karakteristik kualitas air tanah, terutama terhadap kandungan mineral dan zat terlarut. Berdasarkan hasil observasi lapangan, sebagian besar sumur warga berada pada area permukiman dengan jarak yang relatif dekat terhadap aktivitas domestik masyarakat. Selain itu, beberapa titik sampling juga berada dekat dengan lahan pertanian dan kawasan rawa sehingga memungkinkan terjadinya interaksi antara air permukaan dan air tanah melalui proses infiltrasi dan perkolasi. Kondisi fisik wilayah penelitian yang berupa dataran rendah dengan karakteristik tanah jenuh air menyebabkan air tanah relatif lebih mudah menerima masukan zat terlarut dari lingkungan sekitar. Oleh karena itu, kondisi hidrogeologi dan karakteristik fisik

wilayah menjadi faktor penting yang dapat mempengaruhi distribusi kualitas air tanah dan konsentrasi kadmium (Cd) pada wilayah penelitian.

Air tanah pada kondisi alami (*pristine groundwater*) merupakan air tanah yang kualitas kimianya masih dikendalikan oleh proses hidrogeologi dan hidrogeokimia alami, seperti infiltrasi air hujan, interaksi air–batuan (*water rock interaction*), pelapukan mineral, pertukaran ion, dan waktu tinggal air di dalam akuifer, sehingga komposisi kimianya mencerminkan karakteristik geologi penyusun akuifer dan belum dipengaruhi secara signifikan oleh aktivitas antropogenik (Razi *et al.*, 2024). Kondisi alami tersebut menjadi acuan dalam membedakan pengaruh proses geogenik dan aktivitas manusia terhadap kualitas air tanah. Namun, kawasan Rawa Pening saat ini telah mengalami perkembangan aktivitas antropogenik yang cukup intensif, meliputi permukiman, pertanian, budidaya perikanan, serta perubahan penggunaan lahan yang berpotensi memengaruhi kualitas lingkungan. Hal ini didukung oleh beberapa penelitian yang menunjukkan adanya indikasi kontaminasi logam berat pada air tanah, air permukaan, dan tanah sebagai bagian dari sistem hidrologi maupun aktivitas antropogenik di wilayah Rawa Pening. Oleh karena itu, kondisi air tanah di kawasan penelitian tidak lagi dapat diasumsikan sepenuhnya merepresentasikan kondisi *pristine groundwater*, melainkan merupakan hasil interaksi antara proses geologi alami dan tekanan aktivitas antropogenik (Himayati, 2019; Wacano et al., 2025; Syakuri, 2026).

4. 1. 4 Aktivitas dan Potensi Sumber Pencemar

Aktivitas masyarakat mayoritas didominasi oleh aktivitas permukiman dan pertanian yang dapat memengaruhi kualitas lingkungan di sekitarnya. Berdasarkan hasil observasi lapangan dan wawancara dengan masyarakat, air tanah masih menjadi sumber utama kebutuhan rumah tangga sehingga kondisi kualitas air tanah memiliki peranan penting bagi masyarakat sekitar. Pada beberapa titik sampling, kondisi lingkungan di sekitar sumur menunjukkan adanya aktivitas domestik seperti saluran pembuangan rumah tangga, area pencucian, genangan air, serta *septic tank* yang berada relatif dekat dengan lokasi sumur. Selain itu, beberapa titik sampling juga berada pada area yang berdekatan dengan lahan pertanian yang memanfaatkan pupuk dan bahan pendukung pertanian lainnya. Berikut dapat dilihat pada Tabel 4. 1 di bawah ini.

Tabel 4. 1 Kondisi Eksisting Titik Sampling

Titik Sampling	Kedalaman Sumur (m)	Kondisi Eksisting
S1	15	Permukiman dekat pasar
S2	20	Permukiman
S3	10	Sekolah di area permukiman
S4	38	Permukiman, titik paling dekat dengan Rawa Pening
S5	20	Area permukiman, sangat dekat sawah dan toilet
S6	20	Permukiman cukup padat
S7	40	Permukiman dekat sawah
S8	30	Permukiman padat

Berdasarkan Tabel 4. 1, perbedaan kondisi lingkungan pada setiap titik sampling diduga turut mempengaruhi variasi kualitas air tanah di wilayah penelitian. Beberapa sumur dengan kedalaman lebih dangkal cenderung lebih rentan terhadap pengaruh aktivitas permukaan dibandingkan sumur dengan kedalaman yang lebih besar. Selain itu, kondisi tanah pada kawasan dataran rendah yang relatif jenuh air juga memungkinkan zat terlarut dari permukaan lebih mudah mengalami infiltrasi ke dalam sistem air tanah. Berdasarkan hasil pengamatan lapangan, kondisi lingkungan sekitar titik sampling memiliki karakteristik yang berbeda-beda sehingga berpotensi mempengaruhi distribusi parameter kualitas air tanah dan konsentrasi kadmium (Cd). Oleh karena itu, kondisi eksisting lingkungan sekitar sumur menjadi salah satu faktor penting dalam interpretasi hasil analisis spasial pada penelitian ini.

4.2 Hasil Pengukuran Parameter *in situ* dan Konsentrasi Cd

4. 2. 1 Hasil Pengukuran Parameter *in situ*

Pengukuran parameter *in situ* dilakukan secara langsung di lapangan menggunakan *Horiba U-50 Multiparameter Water Quality Meter* untuk memperoleh data awal sebagai gambaran terhadap kondisi fisik dan kimia air tanah pada setiap titik sampling di wilayah penelitian. Parameter yang digunakan antara

lain pH, konduktivitas/*Electrical Conductivity*, *Total Dissolved Solids* (TDS), dan suhu. Pemilihan beberapa parameter ini dilakukan berdasarkan keterkaitan terhadap karakteristik kualitas air tanah, serta mobilitas logam berat Cd. Nilai yang diperoleh dapat mencerminkan kondisi lingkungan perairan, tingkat kandungan ion terlarut, serta potensi terjadinya interaksi antara air tanah dengan faktor lingkungan di sekitarnya. Hasil pengukuran setiap parameter digunakan sebagai landasan dalam menganalisis hubungan antara kondisi kualitas air tanah dengan konsentrasi Cd pada masing-masing titik sampling di kawasan penelitian.

1. Derajat Keasaman (pH)

Berikut ini merupakan hasil pengukuran pH pada setiap titik sampling yang digunakan sebagai sampel air tanah dapat dilihat pada Tabel 4. 2 di bawah ini.

Tabel 4. 2 Hasil Pengukuran Parameter pH

No.	Kode Sampel	pH	Baku Mutu
1.	TS1	6,91	6,5 – 8,5
2.	TS2	7,19	
3.	TS3	7,78	
4.	TS4	7,56	
5.	TS5	7,21	
6.	TS6	7,51	
7.	TS7	8,95	
8.	TS8	8,21	

Berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2023, kandungan pH yang ditunjukkan pada Tabel 4. 2 menunjukkan air sumur warga di dataran rendah Rawa Pening termasuk netral dan memenuhi baku mutu, sehingga air masih layak untuk dimanfaatkan warga untuk kebutuhan sehari-hari. Akan tetapi, terdapat 1 titik yang memiliki pH yang melebihi baku mutu, yaitu pada titik sampel 7 sebesar 8,95. Hasil ini menjadi dasar untuk dilakukan pengujian kembali agar memastikan air aman untuk dikonsumsi.

2. Suhu

Berikut ini merupakan hasil pengukuran suhu pada setiap titik sampling yang digunakan sebagai sampel air tanah Tabel 4. 3 di bawah ini.

Tabel 4. 3 Hasil Pengukuran Parameter Suhu

No.	Kode Sampel	Suhu	Baku Mutu
1.	TS1	27,37	Suhu udara $\pm 3^{\circ}\text{C}$
2.	TS2	27,08	
3.	TS3	26,94	
4.	TS4	26,77	
5.	TS5	27,87	
6.	TS6	27,03	
7.	TS7	27,59	
8.	TS8	28,35	

Berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2023, suhu air yang ditunjukkan pada Tabel 4. 3 tersebut masih berada pada deviasi 3 dari kondisi temperatur udara di sekitarnya. Pada pengukuran di lapangan, didapatkan hasil yang bervariasi dari $26\text{-}28^{\circ}\text{C}$ yang masih tergolong normal. Kondisi ini menunjukkan bahwa suhu masih relatif stabil dan tidak berubah signifikan akibat aktivitas di sekitar wilayah penelitian yang memiliki dataran rendah di iklim tropis.

3. **Konduktivitas/*Electricity Conductivity* (EC)**

Berikut ini merupakan hasil pengukuran konduktivitas pada setiap titik sampling yang digunakan sebagai sampel air tanah dapat dilihat pada Tabel 4. 4 di bawah ini.

Tabel 4. 4 Hasil pengukuran Parameter *Electricity Conductivity* (EC)

No.	Kode Sampel	Konduktivitas	Baku Mutu
1.	TS1	142.72	<320 mg/L
2.	TS2	97.28	
3.	TS3	190.08	
4.	TS4	148.48	
5.	TS5	211.20	
6.	TS6	113.28	
7.	TS7	239.36	
8.	TS8	248.96	

Berdasarkan Permenkes No. 2 Tahun 2023, konduktivitas pada air sumur warga yang ditunjukkan pada Tabel 4. 4 masih berada di bawah baku mutu dengan hasil yang diperoleh berkisar antara 97-250 mg/L. Nilai konduktivitas yang masih memenuhi baku mutu merepresentasikan bahwa kualitas air tanah di lokasi penelitian masih belum mengalami peningkatan kandungan ion terlarut secara signifikan, baik yang berasal dari proses alami maupun aktivitas antropogenik di sekitar wilayah penelitian.

4. *Total Dissolved Solid (TDS)*

Berikut ini merupakan hasil pengukuran TDS pada setiap titik sampling yang digunakan sebagai sampel air tanah Tabel 4. 5 di bawah ini.

Tabel 4. 5 Hasil Pengukuran Parameter *Total Dissolved Solid (TDS)*

No.	Kode Sampel	TDS	Baku Mutu
1.	TS1	133	< 300 mg/L
2.	TS2	92	
3.	TS3	186	
4.	TS4	141	
5.	TS5	200	
6.	TS6	107	
7.	TS7	243	
8.	TS8	252	

Berdasarkan hasil pengukuran pada Tabel 4. 5, nilai TDS pada air sumur warga di dataran rendah Rawa Pening masih berada di bawah baku mutu dengan hasil yang diperoleh berkisar antara 92-252 mg/L. Secara umum, nilai ini dapat menunjukkan kondisi air yang tidak jauh berbeda dengan parameter konduktivitas. Nilai tersebut menjelaskan kondisi air memiliki kandungan zat terlarut dalam air tanah di wilayah penelitian relatif belum mengalami peningkatan yang signifikan.

4. 2. 2 Hasil Analisis Konsentrasi Kadmium (Cd)

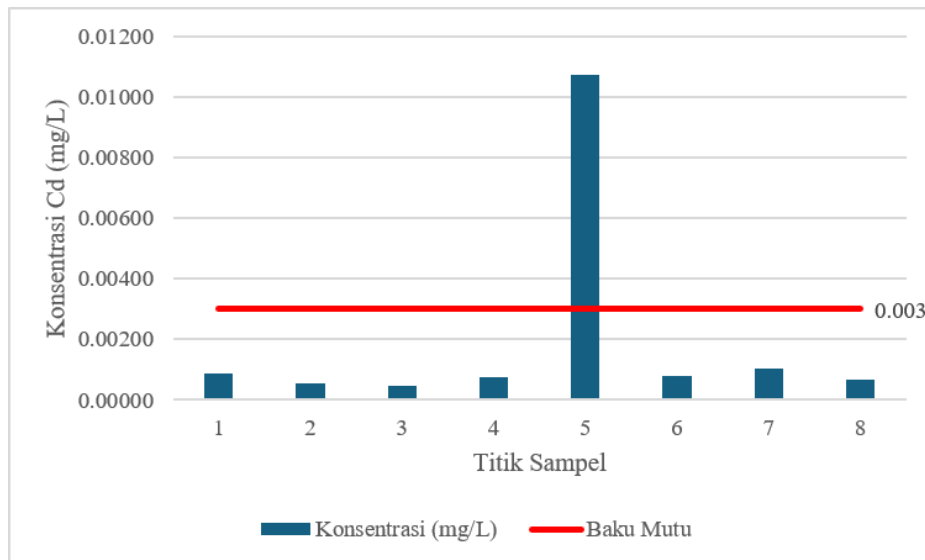
Pembacaan konsentrasi logam kadmium (Cd) yang telah dilakukan dengan metode ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*) menghasilkan nilai konsentrasi sampel duplo dengan satuan ppb, yang selanjutnya akan dikonversi menjadi ppm (mg/L). Berikut merupakan hasil pengujian logam Cd

pada setiap titik sampel yang diambilkan dari sumur warga dapat dilihat pada Tabel 4. 6 di bawah ini.

Tabel 4. 6 Hasil Pengukuran Konsentrasi Kadmium (Cd)

Titik Sampel	Sampel Duplo	Rata-Rata	Conc.	Status
	Ppb	Ppb	mg/L	
S1	0.856	0.858	0.00086	Memenuhi Baku Mutu
	0.86			
S2	0.564	0.562	0.00056	Memenuhi Baku Mutu
	0.56			
S3	0.463	0.4585	0.00046	Memenuhi Baku Mutu
	0.454			
S4	0.734	0.7315	0.00073	Memenuhi Baku Mutu
	0.729			
S5	10.753	10.7485	0.01075	Melebihi Baku Mutu
	10.744			
S6	0.785	0.784	0.00078	Memenuhi Baku Mutu
	0.783			
S7	1.035	1.0355	0.00104	Memenuhi Baku Mutu
	1.036			
S8	0.649	0.6505	0.00065	Memenuhi Baku Mutu
	0.652			

Pada Tabel 4. 6 menunjukkan bahwa konsentrasi Cd di wilayah penelitian memiliki nilai yang bervariasi, namun cenderung kecil dan memenuhi baku mutu. Konsentrasi tertinggi pada air sumur warga berada pada titik S5, yaitu 0,01075 mg/L. Sedangkan untuk konsentrasi Cd terendah berada pada titik S3, yaitu 0,00046 mg/L. Berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan No. 2 Tahun 2023, standar baku mutu untuk parameter Cd yang diperbolehkan dalam air tanah sebesar 0,003 mg/L. Dari hasil pengujian yang telah dilakukan, lokasi titik S5 memiliki konsentrasi Cd yang melebihi baku mutu, yaitu 0,01075 mg/L. Data konsentasi Cd juga dapat dilihat pada diagram di Gambar 4. 4 di bawah ini.



Gambar 4. 4 Perbandingan Konsentrasi Cd dengan Baku Mutu

Variasi konsentrasi yang didapatkan pada Gambar 4. 4 menunjukkan bahwa distribusi Cd pada air tanah di wilayah penelitian tidak bersifat homogen dan dipengaruhi oleh kondisi eksisting di sekitar titik sampling. Konsentrasi yang tinggi pada titik S5 menunjukkan terdapat potensi akumulasi logam berat, khususnya Cd yang lebih besar dibandingkan titik sampling lainnya. Konsentrasi yang tinggi juga menunjukkan adanya indikasi awal terbentuknya *hotspot* pencemaran logam Cd pada di lingkungan sekitar titik S5. Kondisi tersebut dapat diakibatkan oleh faktor lingkungan ataupun aktivitas antropogenik di sekitar lokasi penelitian yang berpotensi menimbulkan kontribusi terhadap peningkatan konsentrasi Cd di dalam air tanah.

Hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa konsentrasi Cd pada delapan titik pengambilan sampel relatif rendah dan sebagian besar masih memenuhi baku mutu air bersih. Meskipun demikian, adanya variasi spasial konsentrasi Cd mengindikasikan bahwa proses yang memengaruhi keberadaan Cd tidak hanya berasal dari faktor geogenik, tetapi juga kemungkinan dipengaruhi oleh kondisi penggunaan lahan dan aktivitas di sekitar lokasi sumur. Hal ini sejalan dengan konsep hidrogeokimia bahwa kualitas air tanah merupakan hasil interaksi antara karakteristik akuifer, proses *water rock interaction*, serta pengaruh aktivitas antropogenik yang berkembang di permukaan.

4. 2. 3 Analisis Statistik Deskriptif dan Presisi Data

Berdasarkan hasil pengujian parameter *in situ* dan parameter logam kadmium (Cd), didapatkan hasil konsentrasi Cd berada pada rentang 0,00046 mg/L hingga 0,01075 mg/L dengan rata-rata 0,00198 mg/L. Berikut merupakan hasil pengujian dari setiap parameter yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4. 7.

Tabel 4. 7 Hasil Analisis Statistik Deskriptif Sampel

Parameter	Minimum	Maksimum	Rata-Rata
Cd (mg/L)	0.00046	0.01075	0.00198
pH	6.91	8.95	7.67
TDS (mg/L)	92	252	169
EC (mg/L)	97.28	248.96	173.92
Suhu (°C)	26.77	28.35	27.38

Berdasarkan hasil pengujian parameter *in situ* dan Kadmium (Cd), ringkasan statistik deskriptif yang disajikan pada Tabel 4.7 menunjukkan adanya perbedaan karakteristik antar parameter pada setiap titik sampling. Parameter pH dan suhu memiliki rentang nilai yang relatif sempit, yang mengindikasikan bahwa kondisi fisik dan kimia dasar air tanah pada wilayah penelitian cenderung seragam. Sementara itu, parameter EC dan TDS menunjukkan variasi yang lebih besar antar lokasi, yang mencerminkan adanya perbedaan kandungan ion dan zat terlarut pada masing-masing sumur. Meskipun demikian, nilai parameter *in situ* yang diperoleh masih berada dalam kisaran yang menunjukkan kondisi kualitas air tanah relatif baik.

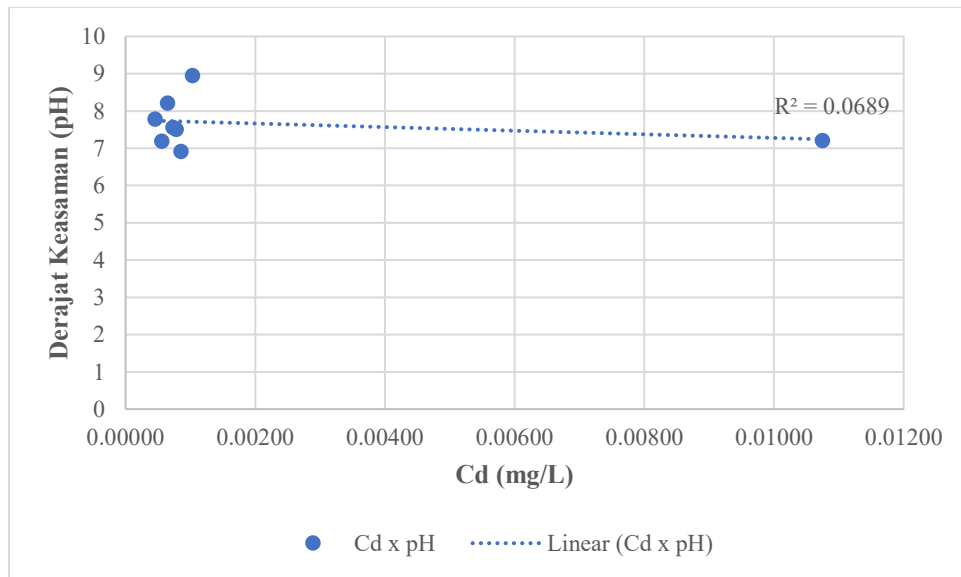
Berbeda dengan parameter *in situ*, konsentrasi Cd menunjukkan pola yang lebih bervariasi antar titik sampling. Sebagian besar lokasi memiliki konsentrasi Cd yang relatif rendah, sedangkan satu titik sampling menunjukkan konsentrasi yang lebih tinggi dibandingkan titik lainnya. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa distribusi Cd pada wilayah penelitian bersifat tidak homogen dan cenderung dipengaruhi oleh faktor lokal yang bekerja pada lokasi tertentu. Temuan ini menjadi dasar untuk analisis lebih lanjut mengenai hubungan parameter kualitas air, kondisi lingkungan, penggunaan lahan, serta distribusi spasial Cd pada subbab berikutnya.

4.3 Hubungan Parameter *in situ* terhadap Konsentrasi Kadmium

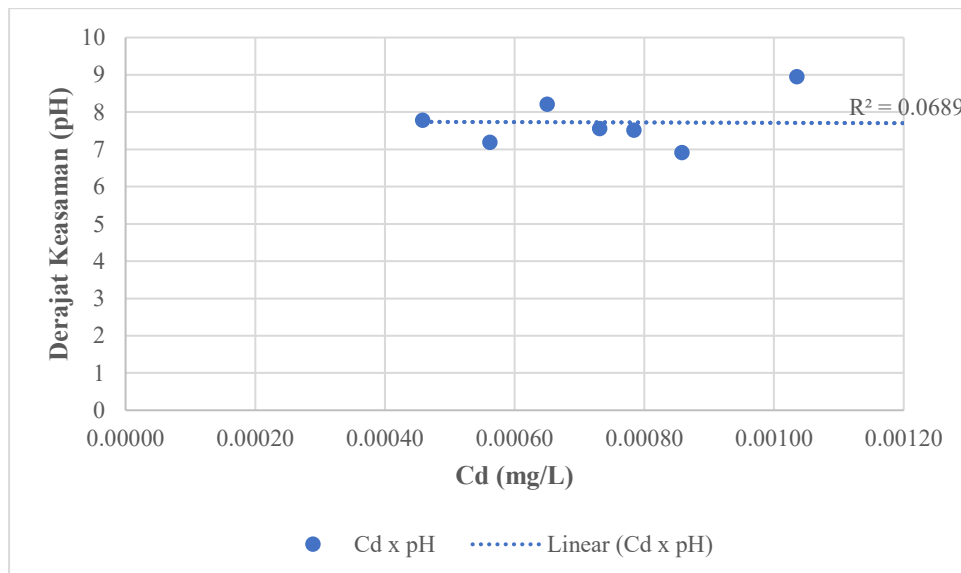
Analisis hubungan parameter *in situ* terhadap konsentrasi kadmium (Cd) dilakukan untuk mengetahui hubungan kondisi fisik dan kimia terhadap keberadaan logam berat pada air tanah di wilayah penelitian. Parameter tersebut antara lain pH, suhu, konduktivitas (*Electrical Conductivity/EC*), dan *Total Dissolved Solid* (TDS). Alasan pemilihan beberapa parameter ini karena dapat berpengaruh terhadap karakteristik kualitas air tanah, terutama dalam proses mobilitas, distribusi, dan kelarutan logam berat di lingkungan sekitarnya. Pendekatan regresi linier sederhana digunakan dalam analisis hubungan antarparameter untuk melihat seberapa besar hubungan antara kondisi kualitas air tanah dengan konsentrasi Cd pada setiap titik sampling. Kondisi tersebut juga didukung oleh nilai standar deviasi Cd yang relatif tinggi, sehingga menunjukkan adanya variasi konsentrasi Cd yang cukup signifikan antar titik sampling.

4. 3. 1 Hubungan pH terhadap Konsentrasi Cd

Nilai pH merupakan salah satu parameter yang dapat memengaruhi mobilitas logam berat dalam air tanah. Hubungan antara pH dan konsentrasi Kadmium (Cd) pada seluruh titik sampling ditunjukkan pada Gambar 4. 5. Berdasarkan grafik tersebut, hubungan pH dan Cd menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) yang rendah sebesar 0,0689. Hasil ini mengindikasikan bahwa perubahan konsentrasi Cd tidak diikuti oleh perubahan pH yang konsisten. Selain itu, terlihat bahwa titik S5 memiliki konsentrasi Cd yang jauh lebih tinggi dibandingkan titik lainnya, sehingga menyebabkan sebagian besar data terkonsentrasi pada rentang konsentrasi rendah. Oleh karena itu, untuk memperjelas pola hubungan pada mayoritas titik sampling dilakukan pembesaran grafik pada rentang konsentrasi Cd yang lebih rendah sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4. 6.



Gambar 4. 5 Hubungan Logam Cd dengan pH



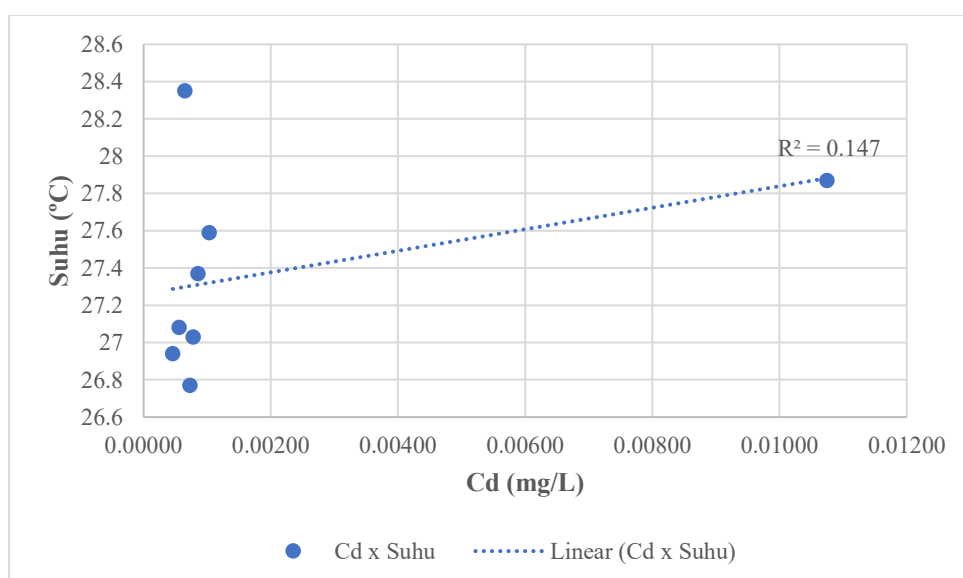
Gambar 4. 6 Hubungan Logam Cd dengan pH (Pembesaran Grafik)

Hasil pembesaran grafik pada Gambar 4. 6 menunjukkan bahwa hubungan antara pH dan konsentrasi Cd tetap tergolong lemah meskipun pengaruh dominasi titik S5 telah dikurangi. Nilai pH pada lokasi penelitian berkisar antara 6,91–8,95 yang menunjukkan kondisi netral hingga sedikit basa. Rentang pH yang relatif sempit menyebabkan kondisi geokimia air tanah antar titik sampling tidak berbeda secara signifikan sehingga pengaruh pH terhadap variasi konsentrasi Cd menjadi kurang terlihat. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perubahan pH pada lokasi penelitian belum cukup besar untuk mengendalikan perbedaan konsentrasi Cd secara nyata.

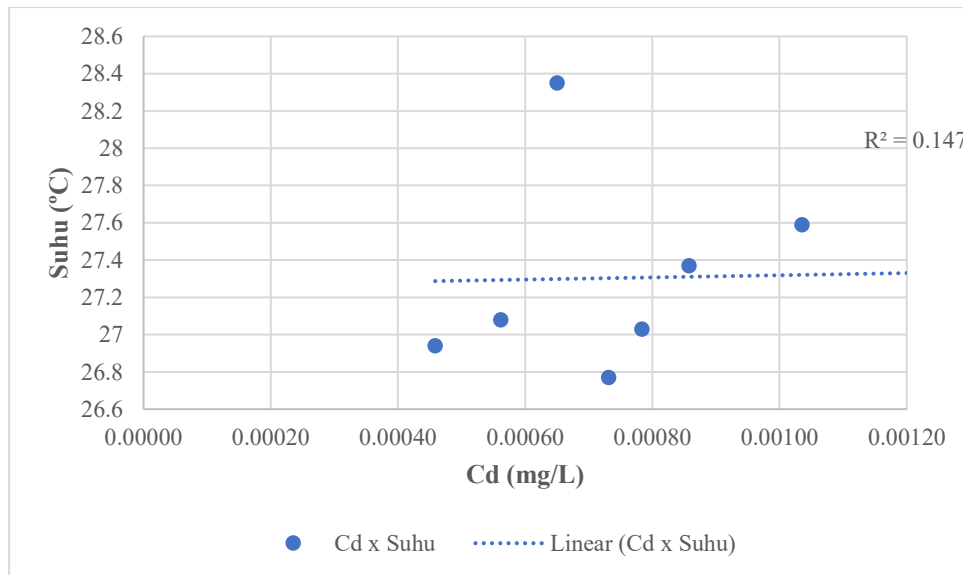
Secara teoritis, Cd memiliki mobilitas yang lebih tinggi pada kondisi asam dan cenderung mengalami adsorpsi atau pengendapan pada kondisi netral hingga basa. Namun, hasil penelitian menunjukkan bahwa konsentrasi Cd tertinggi ditemukan pada titik S5 yang memiliki pH netral, sedangkan titik dengan pH lebih tinggi tidak menunjukkan peningkatan konsentrasi Cd yang serupa. Temuan ini mengindikasikan bahwa distribusi Cd pada wilayah penelitian lebih dipengaruhi oleh faktor lokal, seperti keberadaan sumber pencemar, aktivitas penggunaan lahan di sekitar sumur, serta proses *transport* logam dalam sistem air tanah, dibandingkan oleh variasi pH air tanah itu sendiri. Dengan demikian, pH berperan sebagai faktor yang memengaruhi mobilitas Cd, tetapi bukan faktor dominan yang mengendalikan distribusi Cd pada lokasi penelitian.

4.3.2 Hubungan Suhu terhadap Konsentrasi Cd

Suhu merupakan salah satu parameter fisik yang dapat memengaruhi laju reaksi kimia, kelarutan mineral, dan mobilitas unsur terlarut dalam air tanah. Hubungan antara suhu dan konsentrasi Kadmium (Cd) pada seluruh titik sampling ditunjukkan pada Gambar 4.7. Berdasarkan grafik tersebut, hubungan suhu dan Cd menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) yang rendah. Selain itu, keberadaan titik S5 dengan konsentrasi Cd yang jauh lebih tinggi dibandingkan titik lainnya menyebabkan sebagian besar data terkonsentrasi pada rentang konsentrasi rendah. Oleh karena itu, dilakukan pembesaran grafik pada rentang konsentrasi Cd yang lebih rendah untuk memperjelas pola hubungan antar titik sampling.



Gambar 4. 7 Hubungan Logam Cd dengan Suhu



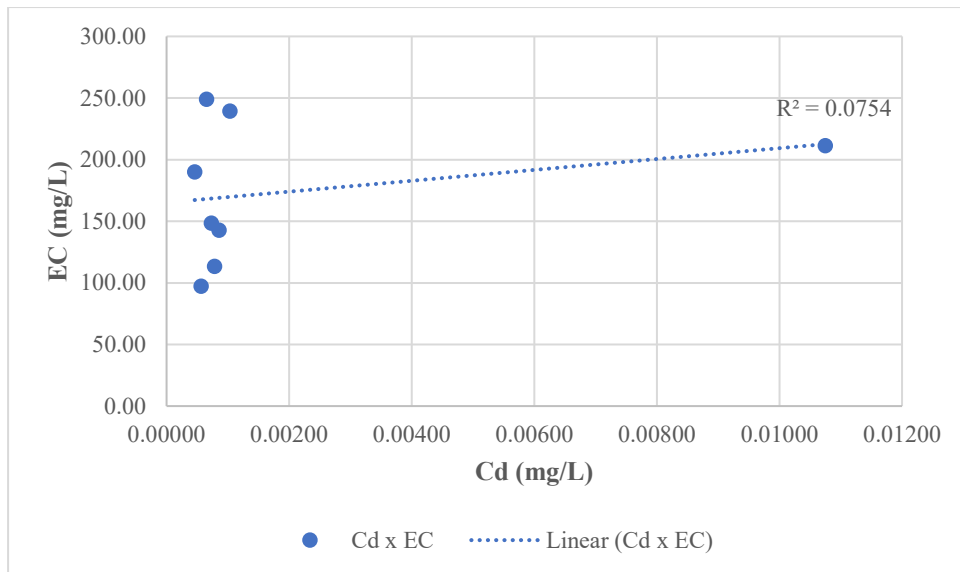
Gambar 4. 8 Hubungan Logam Cd dengan Suhu (Pembesaran Grafik)

Hasil pembesaran grafik pada Gambar 4. 8, menunjukkan bahwa hubungan antara suhu dan konsentrasi Cd tetap lemah meskipun pengaruh dominasi titik S5 telah diminimalkan. Suhu air tanah pada lokasi penelitian berkisar antara 26,94-28,35°C sehingga menunjukkan kondisi yang relatif homogen antar titik sampling. Rentang suhu yang sempit tersebut menyebabkan perbedaan proses kelarutan maupun mobilitas Cd antar lokasi menjadi tidak terlalu signifikan.

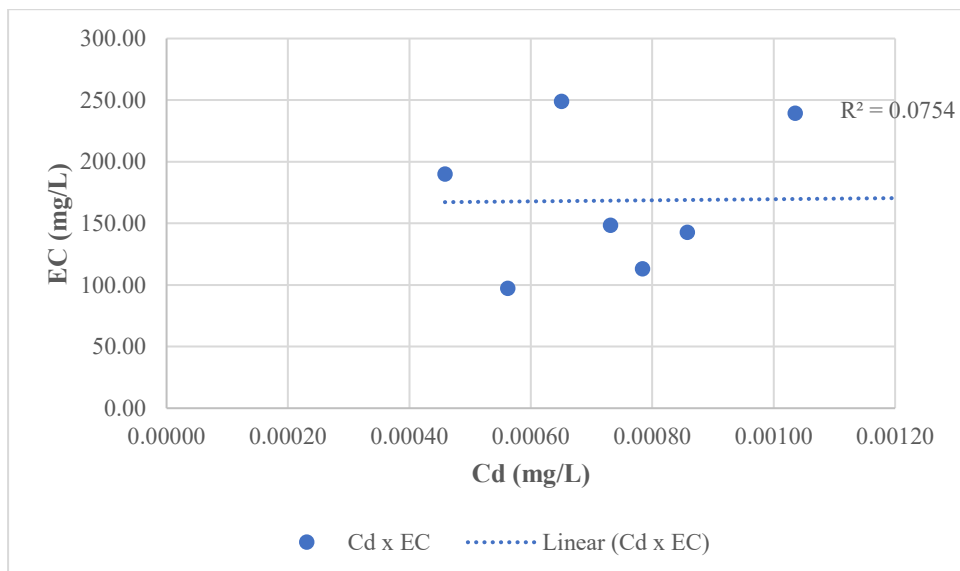
Secara teoritis, peningkatan suhu dapat meningkatkan laju reaksi kimia dan memengaruhi pelepasan logam dari media tanah ke dalam air. Namun, pada penelitian ini variasi suhu yang relatif kecil menunjukkan bahwa suhu bukan merupakan faktor utama yang mengendalikan distribusi Cd.

4. 3. 3 Hubungan TDS dan EC terhadap Konsentrasi Cd

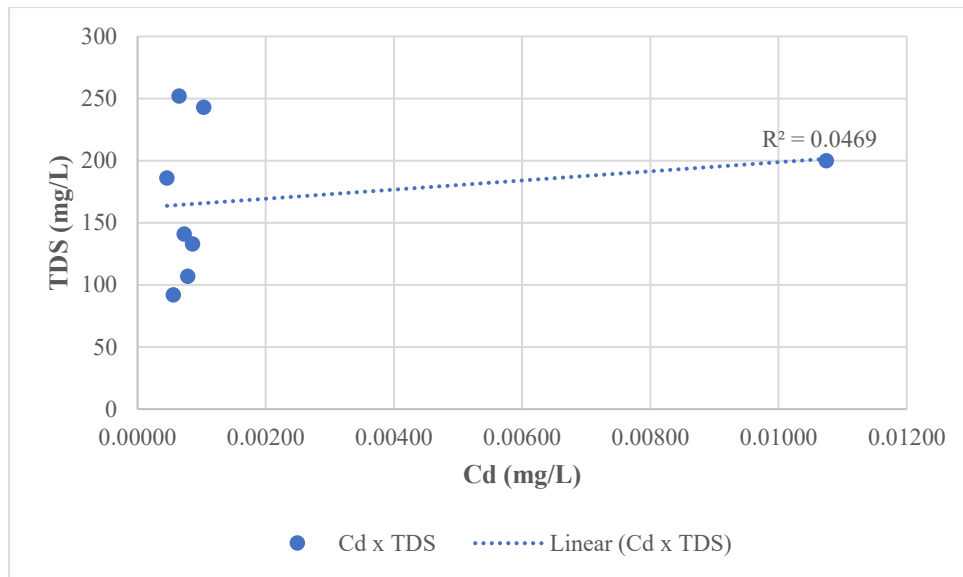
Total Dissolved Solids (TDS) dan *Electrical Conductivity* (EC) merupakan parameter yang menggambarkan karakteristik zat terlarut dalam air tanah. Hubungan TDS dan EC terhadap konsentrasi Kadmium (Cd) ditunjukkan pada Gambar 4. 9 hingga Gambar 4. 12. Berdasarkan grafik seluruh data, hubungan kedua parameter tersebut dengan Cd menunjukkan nilai koefisien determinasi (R^2) yang rendah. Keberadaan titik S5 dengan konsentrasi Cd yang jauh lebih tinggi dibandingkan titik sampling lainnya menyebabkan sebagian besar data terkonsentrasi pada rentang konsentrasi rendah. Oleh karena itu, dilakukan pembesaran grafik pada rentang konsentrasi Cd yang lebih rendah untuk memperjelas pola hubungan antara TDS, EC, dan Cd pada mayoritas titik sampling.



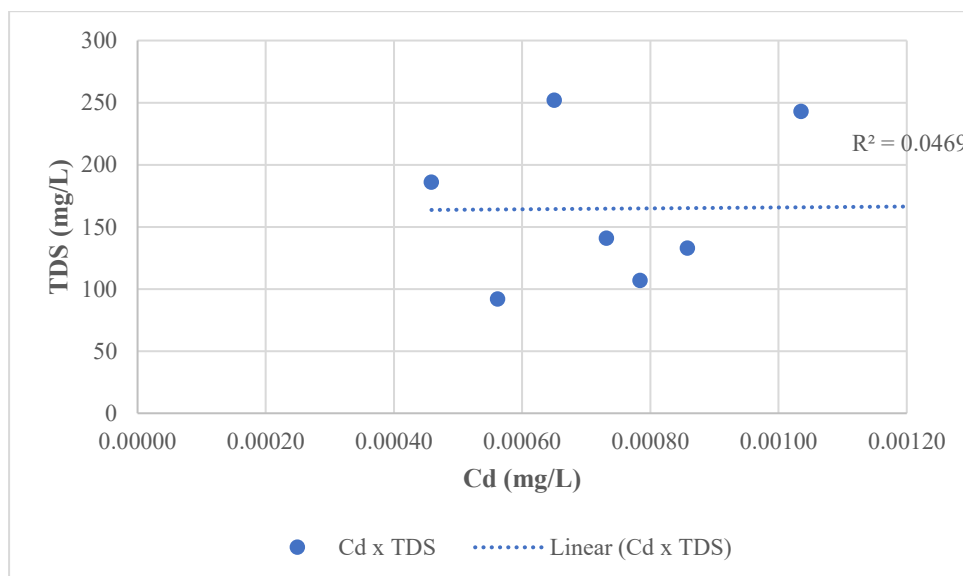
Gambar 4. 9 Hubungan Logam Cd dengan EC



Gambar 4. 10 Hubungan Logam Cd dengan EC (Pembesaran Grafik)



Gambar 4. 11 Hubungan Logam Cd dengan TDS



Gambar 4. 12 Hubungan Logam Cd dengan TDS (Pembesaran Grafik)

Hasil grafik pada Gambar 4. 9 hingga Gambar 4. 12 menunjukkan bahwa hubungan TDS maupun EC terhadap konsentrasi Cd tetap tergolong lemah meskipun pengaruh dominasi titik S5 telah dikurangi. Secara teoritis, peningkatan kandungan zat terlarut dan ion dalam air dapat meningkatkan nilai TDS dan EC. Namun, pola tersebut tidak terlihat secara jelas pada penelitian ini. Titik S5 yang memiliki konsentrasi Cd tertinggi tidak menunjukkan nilai TDS maupun EC tertinggi, sedangkan beberapa titik dengan nilai TDS dan EC yang lebih tinggi justru memiliki konsentrasi Cd yang relatif rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi Cd tidak selalu diikuti oleh peningkatan total zat terlarut maupun jumlah ion terlarut dalam air tanah.

Hubungan yang lemah tersebut dapat dijelaskan oleh karakteristik Cd yang hanya merupakan salah satu komponen penyusun zat terlarut dalam air tanah dengan konsentrasi yang relatif kecil dibandingkan ion-ion utama seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Cl^- , dan SO_4^{2-} . Selain itu, parameter Cd yang dianalisis pada penelitian ini merupakan Cd total hasil proses destruksi sampel sebelum analisis ICP-MS, sehingga konsentrasi Cd yang terukur tidak seluruhnya merepresentasikan fraksi ion terlarut yang secara langsung memengaruhi nilai EC maupun TDS. Oleh karena itu, variasi TDS dan EC pada lokasi penelitian lebih mencerminkan perubahan komposisi total zat terlarut dan ion mayor dalam air tanah, sedangkan distribusi Cd cenderung dipengaruhi oleh keberadaan sumber pencemar lokal, aktivitas penggunaan lahan, serta proses *transport* logam di lingkungan bawah permukaan.

4. 3. 4 Analisis Kondisi pada Setiap Titik Sampling

Kondisi kualitas air tanah pada masing-masing titik sampling memperlihatkan karakteristik yang relatif berbeda, terutama pada parameter Cd. Sebagian besar titik sampling, yaitu S1, S2, S3, S4, S6, S7, dan S8, memiliki konsentrasi Cd yang masih rendah dan berada di bawah baku mutu. Pada titik-titik tersebut, parameter pH, suhu, EC, dan TDS juga berada pada kisaran yang relatif normal sehingga tidak menunjukkan adanya indikasi penurunan kualitas air tanah yang signifikan.

Perbedaan yang cukup signifikan ditemukan pada titik S5 yang memiliki konsentrasi Cd tertinggi sekaligus menjadi satu-satunya lokasi yang melebihi baku mutu. Meskipun demikian, kondisi parameter *in situ* pada titik tersebut tidak berbeda jauh dibandingkan lokasi lainnya. Nilai pH masih berada pada kondisi netral, sedangkan nilai EC dan TDS tidak merupakan nilai tertinggi di wilayah penelitian. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi Cd pada S5 tidak berkaitan secara langsung dengan perubahan karakteristik kualitas air tanah secara umum.

Berdasarkan kondisi eksisting di sekitar lokasi, titik S5 berada pada area yang didominasi lahan pertanian dengan berbagai aktivitas penggunaan lahan yang berlangsung secara intensif. Oleh karena itu, keberadaan konsentrasi Cd yang relatif tinggi pada titik tersebut diduga lebih dipengaruhi oleh kondisi lingkungan lokal dibandingkan faktor kualitas air tanah secara regional. Hasil ini menjadi dasar

untuk melakukan analisis lebih lanjut mengenai potensi sumber pencemar dan pola distribusi spasial Cd pada subbab berikutnya.

Selain itu, kedalaman dan kondisi sumur juga dapat menjadi faktor yang harus dipertimbangkan dalam menjelaskan karakteristik air tanah. Berdasarkan hasil pengamatan, sumur dengan kedalaman yang lebih besar memiliki nilai pH, EC, dan TDS yang relatif tinggi dan stabil pada sumur dengan kedalaman > 30 meter dikarenakan berada pada akuifer yang lebih terlindungi dari pengaruh pencemar di permukaan. Hal ini dapat dipengaruhi oleh proses mineralisasi alami yang terjadi pada air tanah dengan lapisan batuan dan sedimen dalam jangka waktu yang lama. Akan tetapi, pada titik-titik tersebut memiliki konsentrasi Cd di bawah baku mutu, sedangkan S5 dengan kedalaman 20 meter memiliki konsentrasi Cd tertinggi.

Interpretasi ini menunjukkan bahwa kedalaman sumur yang lebih kecil dengan kondisi sumur yang kurang baik dapat mempengaruhi kualitas air tanah pada sumur tersebut. Temuan ini juga didukung oleh penelitian yang menjelaskan bahwa kedalaman sumur yang tidak terlalu dalam dengan konstruksi yang kurang baik dapat mengakibatkan masuknya air yang mengandung kadmium ke dalam sumur (Qadriyah et al., 2019; World Health Organization, 2002). Air dengan kandungan sumber pencemar logam kadmium (Cd) yang masuk dan tertahan di dalam tanah dalam jangka waktu lama akan terakumulasi dan menyebabkan kualitas air berubah (Puspitarini *et al.*, 2023).

4.3.5 Sintesis Hubungan Antarparameter

Berdasarkan hasil analisis hubungan antar parameter, seluruh parameter in situ menunjukkan hubungan yang lemah terhadap konsentrasi Cd. Nilai koefisien determinasi (R^2) yang rendah mengindikasikan bahwa perubahan konsentrasi Cd tidak dikendalikan secara langsung oleh variasi pH, suhu, EC, maupun TDS pada wilayah penelitian. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa faktor yang memengaruhi distribusi Cd memiliki karakteristik yang lebih kompleks dibandingkan parameter kualitas air tanah umum. Meskipun pH berperan dalam mengendalikan mobilitas logam, rentang pH pada lokasi penelitian relatif sempit dan masih berada pada kondisi netral hingga sedikit basa, sehingga pengaruhnya terhadap variasi Cd menjadi tidak terlalu terlihat. Demikian pula dengan suhu yang menunjukkan kondisi relatif homogen sehingga tidak memberikan pengaruh yang signifikan terhadap distribusi Cd.

Hubungan yang lemah antara EC, TDS, dan Cd menunjukkan bahwa peningkatan kandungan ion maupun zat terlarut dalam air tanah tidak selalu diikuti oleh peningkatan konsentrasi Cd. Secara hidrogeokimia, nilai EC dan TDS lebih banyak dipengaruhi oleh keberadaan ion mayor seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , dan Cl^- yang konsentrasinya jauh lebih besar dibandingkan Cd. Oleh karena itu, lokasi dengan nilai EC dan TDS tinggi belum tentu memiliki konsentrasi Cd yang tinggi. Kondisi ini terlihat pada titik S7 dan S8 yang memiliki nilai EC dan TDS relatif tinggi, namun konsentrasi Cd tetap rendah. Sebaliknya, titik S5 yang menjadi *hotspot* Cd tidak menunjukkan nilai EC maupun TDS tertinggi. Temuan tersebut menunjukkan bahwa distribusi Cd lebih dipengaruhi oleh sumber pencemar lokal dan proses mobilisasi logam pada lingkungan bawah permukaan dibandingkan perubahan total kandungan ion dan zat terlarut dalam air tanah.

Secara keseluruhan, hasil penelitian menunjukkan bahwa distribusi Cd pada wilayah penelitian bersifat heterogen dan tidak mengikuti pola distribusi parameter kualitas air tanah secara umum. Keberadaan *hotspot* pada titik S5 memperlihatkan bahwa peningkatan konsentrasi Cd terjadi akibat pengaruh faktor lokal yang spesifik pada lokasi tertentu. Dengan demikian, parameter in situ lebih berperan sebagai indikator kondisi hidrogeokimia air tanah, sedangkan distribusi Cd pada penelitian ini lebih mencerminkan pengaruh sumber pencemar dan proses *transport* logam yang terjadi pada lingkungan sekitar lokasi sampling.

4.4 Potensi Sumber Pencemar terhadap Kualitas Air Tanah

4.4.1 Sumber Pencemar Antropogenik

Keberadaan Kadmium (Cd) pada air tanah di wilayah penelitian diduga berkaitan dengan aktivitas antropogenik yang berkembang di sekitar lokasi sampling. Berdasarkan kondisi penggunaan lahan, sebagian besar wilayah penelitian dimanfaatkan sebagai lahan pertanian yang dikelola secara aktif, disertai keberadaan permukiman dan fasilitas umum pada beberapa lokasi. Aktivitas pertanian berpotensi menjadi salah satu jalur masuk Cd ke lingkungan karena beberapa jenis pupuk fosfat dan bahan agrokimia diketahui mengandung unsur Cd dalam konsentrasi rendah (Sutrisno & Kuntastyuti, 2015). Apabila digunakan secara terus-menerus dalam jangka panjang, unsur tersebut dapat terakumulasi pada

lapisan tanah dan menjadi bagian dari residu lingkungan pertanian (Wihardjaka & Harsanti, 2018).

Akumulasi Cd pada tanah selanjutnya dapat mengalami perpindahan menuju sistem air tanah melalui proses infiltrasi dan perkolasi, terutama pada wilayah dataran rendah yang memiliki interaksi cukup intensif antara air permukaan, tanah, dan air tanah (Aryanto & Handinata, 2017). Hasil penelitian menunjukkan bahwa area dengan konsentrasi Cd tertinggi berada pada lokasi yang didominasi lahan pertanian. Meskipun penelitian ini tidak melakukan identifikasi sumber pencemar secara langsung, pola tersebut menunjukkan adanya keterkaitan antara aktivitas penggunaan lahan dengan distribusi Cd yang terbentuk pada wilayah penelitian.

4. 4. 2 Faktor Lingkungan Alami

Selain dipengaruhi oleh aktivitas manusia, keberadaan Cd dalam air tanah juga dipengaruhi oleh faktor lingkungan alami yang mengontrol proses pergerakan dan mobilitas unsur di bawah permukaan. Wilayah penelitian yang berada pada kawasan dataran rendah sekitar Rawa Pening tersusun oleh material sedimen yang memungkinkan terjadinya interaksi antara air tanah dan lapisan geologi dalam waktu relatif lama. Interaksi tersebut dapat meningkatkan kandungan mineral terlarut dalam air tanah yang tercermin dari nilai *Electrical Conductivity* (EC) dan *Total Dissolved Solid* (TDS) pada beberapa titik sampling (Irawan *et al.*, 2016).

Namun demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa lokasi dengan nilai EC dan TDS tertinggi tidak berasosiasi dengan konsentrasi Cd tertinggi. Titik S7 dan S8 memiliki nilai EC dan TDS yang relatif tinggi, tetapi konsentrasi Cd tetap rendah dan berada di bawah baku mutu. Temuan ini menunjukkan bahwa proses mineralisasi alami lebih berpengaruh terhadap peningkatan ion mayor dan zat terlarut dalam air tanah dibandingkan peningkatan konsentrasi Cd (Rusydi, 2018). Dengan demikian, faktor alami berperan dalam membentuk karakteristik hidrogeokimia air tanah secara umum, tetapi tidak dapat menjelaskan secara langsung terbentuknya *hotspot* Cd pada wilayah penelitian.

4. 4. 3 Keterkaitan Penggunaan Lahan dengan Distribusi Kadmium

Berdasarkan hasil analisis distribusi spasial Cd dan kondisi penggunaan lahan di sekitar lokasi sampling, terlihat bahwa pola persebaran Cd tidak mengikuti pola distribusi parameter kualitas air tanah secara umum. Hubungan antara pH, suhu, EC, dan TDS dengan Cd menunjukkan koefisien determinasi yang rendah,

sehingga perubahan parameter in situ tidak secara langsung mengendalikan peningkatan konsentrasi Cd. Sebaliknya, distribusi Cd cenderung menunjukkan pola lokal yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan aktivitas yang berlangsung di sekitar titik sampling.

Keterkaitan tersebut terlihat pada titik S5 yang menjadi *hotspot* Cd dalam penelitian ini. Berdasarkan kondisi eksisting, area di sekitar titik S5 didominasi oleh lahan pertanian yang aktif digunakan dan berada pada kawasan dataran rendah dengan potensi infiltrasi yang cukup tinggi. Kondisi tersebut memungkinkan akumulasi Cd pada tanah pertanian mengalami mobilisasi menuju air tanah melalui proses infiltrasi dan perkolasi (Aryanto & Hardiman, 2017). Sementara itu, titik-titik lain yang memiliki kondisi kualitas air tanah relatif serupa tidak menunjukkan peningkatan konsentrasi Cd yang signifikan. Temuan ini menunjukkan bahwa pola penggunaan lahan memiliki keterkaitan terhadap distribusi Cd pada wilayah penelitian, dimana aktivitas pertanian diduga menjadi faktor antropogenik yang lebih berpengaruh dibandingkan faktor kualitas air tanah secara umum (Sutrisno & Kuntastyuti, 2015). Dengan demikian, distribusi Cd pada wilayah penelitian lebih mencerminkan pengaruh aktivitas penggunaan lahan dan proses *transport* logam pada lingkungan bawah permukaan dibandingkan perubahan parameter kualitas air tanah yang bersifat regional.

Hasil penelitian ini juga diperkuat oleh penelitian nitrat yang dilakukan pada lokasi dan titik sampling yang sama. Berdasarkan hasil pengujian nitrat, titik S5 yang menjadi *hotspot* Cd justru memiliki konsentrasi nitrat yang relatif rendah sebesar 0,608 mg/L, sedangkan konsentrasi nitrat tertinggi ditemukan pada titik S1 dan S3 yang memiliki konsentrasi Cd rendah. Perbedaan pola tersebut menunjukkan bahwa distribusi Cd tidak mengikuti pola persebaran nitrat maupun parameter kualitas air tanah secara umum. Kondisi ini mengindikasikan bahwa keterkaitan penggunaan lahan terhadap distribusi Cd lebih dipengaruhi oleh proses akumulasi dan mobilisasi logam berat dalam tanah yang berlangsung dalam jangka panjang dibandingkan masukan pencemar yang mudah terlarut seperti nitrat. Dengan demikian, pola distribusi Cd pada wilayah penelitian menunjukkan mekanisme lingkungan yang lebih kompleks dan tidak dapat dijelaskan hanya berdasarkan keberadaan aktivitas pertanian atau peningkatan unsur hara di dalam air tanah (Aprilliani, 2026)

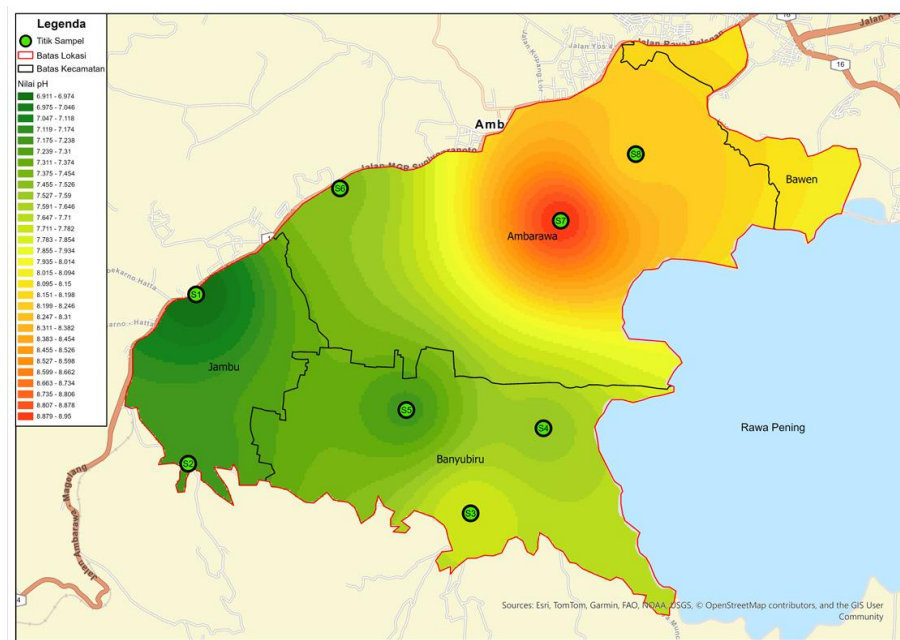
Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan lahan pertanian memiliki keterkaitan spasial yang lebih kuat terhadap distribusi Cd dibandingkan parameter kualitas air tanah secara umum. Temuan ini diperkuat oleh keberadaan hotspot pada titik S5 yang berada pada area dominasi pertanian, sementara parameter *in situ* pada titik tersebut masih berada pada kisaran normal. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa proses akumulasi dan transport Cd lebih dipengaruhi oleh aktivitas penggunaan lahan dan karakteristik lingkungan lokal dibandingkan perubahan kualitas air tanah secara regional.

4.5 Analisis *Hotspot* dan Distribusi Spasial

4.5.1 Hasil Interpolasi Distribusi Spasial Parameter *in situ*

1. Derajat Keasaman (pH)

Berikut merupakan hasil interpolasi distribusi spasial parameter pH menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) dapat dilihat pada Gambar 4. 9 dibawah ini.



Gambar 4. 13 Peta Pola Persebaran IDW Parameter pH

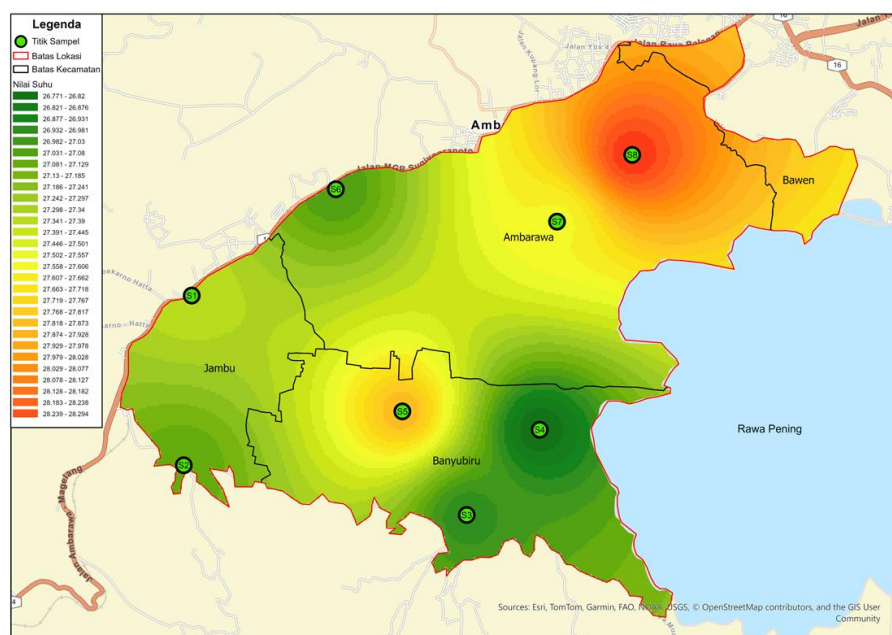
Hasil interpolasi spasial parameter pH menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) ditunjukkan pada Gambar 4. 13. Peta tersebut menunjukkan adanya kecenderungan peningkatan nilai pH dari bagian barat menuju timur laut wilayah penelitian. Pola ini mengindikasikan adanya

variasi kondisi hidrogeokimia air tanah yang dipengaruhi oleh interaksi antara air tanah dan material penyusun akuifer, proses pelarutan mineral, serta lamanya waktu kontak air dengan lapisan bawah permukaan. Meskipun demikian, sebagian besar wilayah penelitian masih berada pada kondisi netral hingga sedikit basa, sehingga menunjukkan bahwa sistem air tanah di kawasan penelitian relatif stabil dan tidak mengalami perubahan kimia yang signifikan.

Apabila dibandingkan dengan pola distribusi Kadmium (Cd), sebaran pH tidak menunjukkan kesesuaian spasial yang kuat. Zona dengan pH yang relatif lebih tinggi tidak berasosiasi langsung dengan lokasi konsentrasi Cd tertinggi, sehingga mengindikasikan bahwa variasi pH bukan merupakan faktor dominan yang mengendalikan distribusi Cd pada wilayah penelitian. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keberadaan Cd lebih dipengaruhi oleh faktor lokal, seperti sumber pencemar, karakteristik penggunaan lahan, dan proses *transport* logam dalam sistem air tanah, dibandingkan oleh variasi pH yang relatif kecil antar lokasi sampling.

2. Suhu

Berikut merupakan hasil interpolasi distribusi spasial parameter suhu menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) dapat dilihat pada Gambar 4. 14 dibawah ini.



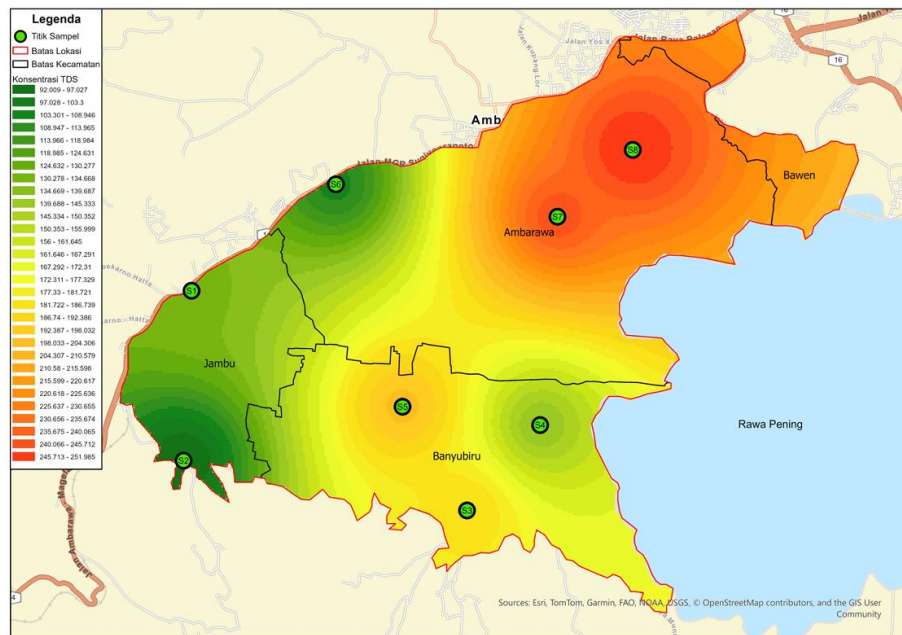
Gambar 4. 14 Peta Pola Persebaran IDW Parameter Suhu

Hasil interpolasi spasial parameter suhu menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) ditunjukkan pada Gambar 4. 14. Peta interpolasi menunjukkan bahwa distribusi suhu air tanah pada wilayah penelitian relatif homogen dengan variasi spasial yang tidak terlalu mencolok. Zona dengan suhu yang lebih tinggi cenderung berada pada bagian timur laut wilayah penelitian, sedangkan suhu yang lebih rendah tersebar pada bagian selatan dan barat wilayah penelitian. Pola tersebut menunjukkan bahwa kondisi termal air tanah pada kawasan penelitian masih dipengaruhi oleh karakteristik alami lingkungan, seperti kedalaman sumur, sirkulasi air tanah, serta interaksi antara air tanah dan lapisan geologi di bawah permukaan.

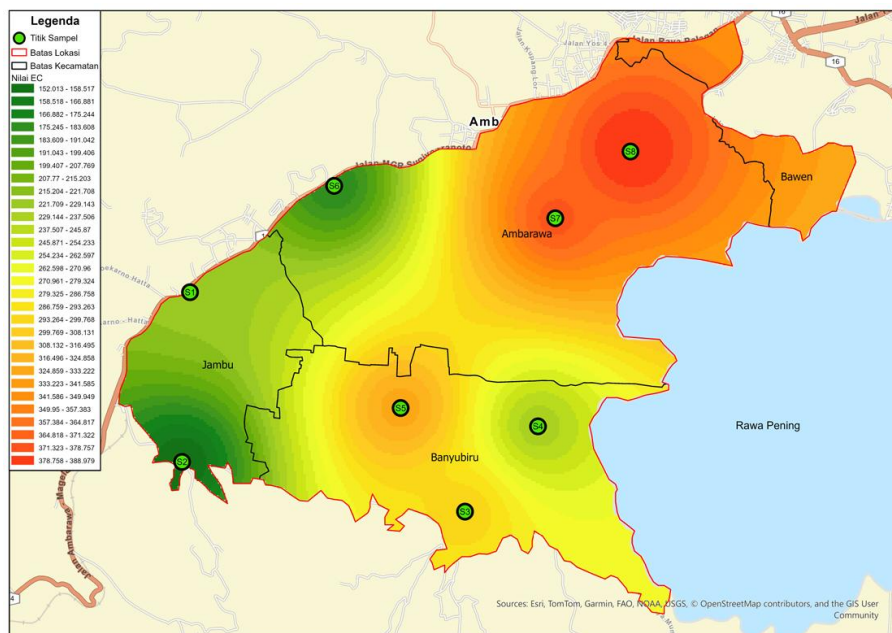
Distribusi suhu yang relatif seragam mengindikasikan bahwa kondisi fisik air tanah pada wilayah penelitian masih stabil dan tidak menunjukkan adanya pengaruh lingkungan yang signifikan terhadap perubahan temperatur. Apabila dibandingkan dengan pola distribusi Kadmium (Cd), sebaran suhu juga tidak menunjukkan kesesuaian spasial yang kuat. Lokasi dengan suhu relatif lebih tinggi tidak selalu diikuti oleh peningkatan konsentrasi Cd, sehingga menunjukkan bahwa suhu bukan merupakan faktor utama yang mengendalikan distribusi Cd pada wilayah penelitian. Variasi konsentrasi Cd diduga lebih dipengaruhi oleh keberadaan sumber pencemar dan proses *transport* logam di dalam sistem air tanah dibandingkan oleh perubahan suhu antar lokasi sampling.

3. *Total Dissolved Solid* (TDS) dan *Electricity Conductivity* (EC)

Berikut merupakan hasil interpolasi distribusi spasial parameter TDS dan EC menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) dapat dilihat pada Gambar 4. 11 dan 4. 12 dibawah ini.



Gambar 4. 15 Peta Pola Persebaran IDW Parameter TDS



Gambar 4. 16 Peta Pola Persebaran IDW Parameter EC

Hasil interpolasi spasial parameter TDS dan EC menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) ditunjukkan pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.16. Kedua peta menunjukkan pola distribusi yang relatif serupa, yaitu adanya kecenderungan peningkatan nilai dari bagian barat menuju timur laut wilayah penelitian. Pola tersebut mengindikasikan adanya variasi karakteristik hidrogeokimia air tanah yang berkaitan dengan kandungan ion dan zat terlarut pada masing-masing lokasi. Secara umum, zona dengan

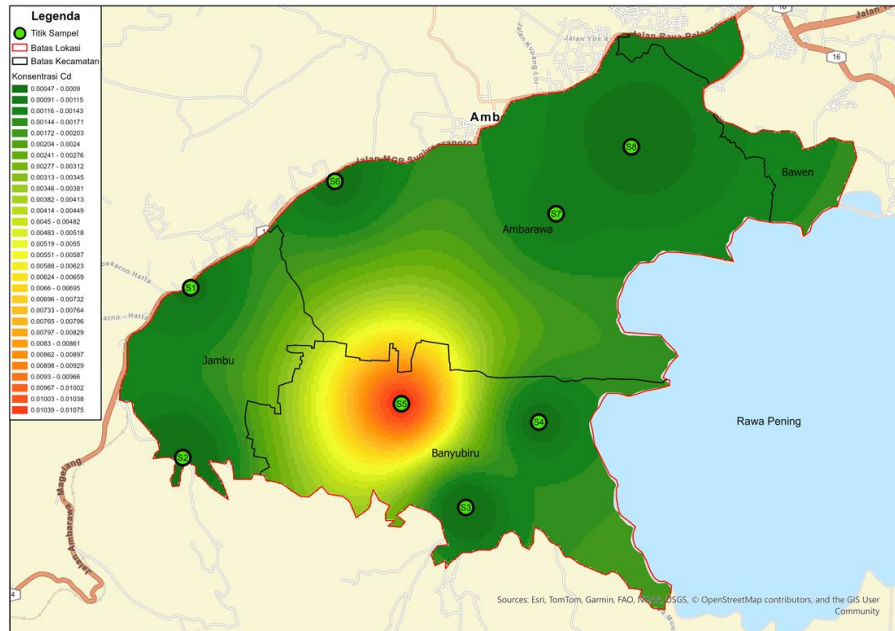
nilai TDS dan EC yang lebih tinggi menunjukkan wilayah yang memiliki kandungan mineral dan ion terlarut lebih besar akibat interaksi air tanah dengan material penyusun akuifer selama proses pergerakan dan penyimpanan air di bawah permukaan.

Meskipun memiliki pola spasial yang relatif jelas, distribusi TDS dan EC tidak menunjukkan kesesuaian langsung dengan distribusi Kadmium (Cd). Zona dengan nilai TDS dan EC yang tinggi tidak berasosiasi dengan lokasi konsentrasi Cd tertinggi, sehingga menunjukkan bahwa peningkatan kandungan ion dan zat terlarut dalam air tanah tidak secara langsung diikuti oleh peningkatan konsentrasi Cd. Kondisi ini mengindikasikan bahwa variasi TDS dan EC lebih mencerminkan perubahan komposisi ion mayor dan mineral terlarut dalam air tanah, sedangkan distribusi Cd cenderung dipengaruhi oleh faktor lokal seperti sumber pencemar, karakteristik penggunaan lahan, serta proses mobilisasi logam pada lingkungan bawah permukaan. Dengan demikian, TDS dan EC dapat menggambarkan kondisi hidrogeokimia air tanah secara umum, namun tidak dapat digunakan sebagai indikator langsung untuk menjelaskan pola distribusi Cd pada wilayah penelitian.

Ketidaksesuaian antara pola distribusi TDS, EC, dan Cd menunjukkan bahwa peningkatan kandungan ion maupun zat terlarut dalam air tanah tidak selalu diikuti oleh peningkatan konsentrasi Cd. Kondisi tersebut terlihat pada wilayah timur laut yang memiliki nilai TDS dan EC relatif tinggi, namun tidak menjadi lokasi dengan konsentrasi Cd tertinggi. Sebaliknya, *hotspot* Cd teridentifikasi pada area tengah wilayah penelitian yang tidak berasosiasi dengan nilai TDS maupun EC maksimum. Hal ini menunjukkan bahwa Cd hanya merupakan salah satu komponen minor dalam sistem air tanah, sedangkan nilai TDS dan EC lebih banyak dipengaruhi oleh keberadaan ion mayor seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , dan Cl^- yang konsentrasinya jauh lebih besar. Oleh karena itu, distribusi Cd pada wilayah penelitian lebih merefleksikan pengaruh sumber pencemar lokal dan proses mobilisasi logam dibandingkan perubahan total kandungan ion dan zat terlarut dalam air tanah.

4. 5. 2 Hasil Interpolasi Distribusi Spasial Kadmium (Cd)

Berikut merupakan hasil interpolasi distribusi spasial parameter logam berat Cd di air tanah menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) dapat dilihat pada Gambar 4. 17 dibawah ini.



Gambar 4. 17 Peta Pola Persebaran IDW Parameter Kadmium (Cd)

Pola distribusi spasial Kadmium (Cd) yang disajikan pada Gambar 4.17 menunjukkan bahwa sebaran konsentrasi Cd di wilayah penelitian tidak terbentuk secara merata. Konsentrasi yang relatif tinggi terkonsentrasi pada bagian tengah wilayah penelitian, sedangkan area lainnya didominasi oleh konsentrasi yang lebih rendah. Pola tersebut menunjukkan bahwa distribusi Cd cenderung bersifat lokal dan dipengaruhi oleh kondisi tertentu yang bekerja pada lokasi spesifik.

Keberadaan zona konsentrasi tinggi yang terpusat di sekitar titik S5 memperlihatkan adanya perbedaan karakteristik lingkungan dibandingkan titik sampling lainnya. Sementara itu, titik S1, S2, S3, S4, S6, S7, dan S8 menunjukkan pola sebaran yang relatif homogen dengan konsentrasi Cd yang masih rendah. Berdasarkan hasil interpolasi tersebut, peningkatan konsentrasi Cd pada wilayah penelitian tidak terjadi secara menyeluruh, tetapi terfokus pada area tertentu yang kemudian membentuk hotspot pencemaran lokal. Oleh karena itu, diperlukan interpretasi lebih lanjut untuk memahami faktor-faktor yang berperan dalam pembentukan hotspot tersebut.

4. 5. 3 Interpretasi *Hotspot* Konsentrasi Kadmium (Cd)

Interpretasi *hotspot* Cd dilakukan dengan mengacu pada hasil interpolasi yang ditunjukkan pada Gambar 4.17 serta kondisi penggunaan lahan di sekitar titik S5. Keberadaan *hotspot* yang hanya muncul pada satu lokasi menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi Cd pada wilayah penelitian tidak dikendalikan oleh faktor regional, melainkan lebih dipengaruhi oleh kondisi lingkungan lokal yang bekerja secara spesifik pada area tersebut. Hal ini sejalan dengan hasil analisis hubungan parameter *in situ* yang menunjukkan korelasi relatif lemah terhadap konsentrasi Cd, sehingga perubahan pH, suhu, EC, dan TDS tidak dapat menjelaskan secara langsung terbentuknya *hotspot*.

Berdasarkan kondisi eksisting, area sekitar titik S5 didominasi oleh lahan pertanian yang dimanfaatkan secara intensif. Dalam jangka panjang, penggunaan pupuk fosfat dan bahan agrokimia tertentu berpotensi menyebabkan akumulasi unsur Cd pada lapisan tanah. Adapun faktor lain yang berpotensi meningkatkan kandungan Cd di air tanah, seperti konstruksi sumur yang buruk dan limbah dari aktivitas domestik yang berada di sekitar titik sampling meskipun pengaruhnya juga sangat kecil. Unsur yang terakumulasi tersebut kemudian dapat mengalami mobilisasi melalui proses infiltrasi dan perkolasi menuju sistem air tanah dangkal yang dimanfaatkan masyarakat. Mekanisme ini memungkinkan terjadinya peningkatan konsentrasi Cd pada lokasi tertentu tanpa diikuti perubahan yang signifikan pada parameter kualitas air tanah lainnya.

Meskipun demikian, penelitian ini tidak melakukan analisis identifikasi sumber pencemar secara langsung (*source tracking*), sehingga hubungan antara aktivitas pertanian dan keberadaan Cd pada air tanah masih bersifat indikatif. Interpretasi yang dilakukan didasarkan pada kesesuaian antara pola distribusi spasial Cd, kondisi penggunaan lahan, dan mekanisme *transport* logam pada lingkungan bawah permukaan. Dengan demikian, *hotspot* Cd yang terbentuk pada wilayah penelitian lebih merepresentasikan pengaruh faktor lingkungan lokal dan aktivitas penggunaan lahan dibandingkan perubahan kualitas air tanah secara umum.

4. 5. 4 Statistik Model Interpolasi

Evaluasi statistik model interpolasi dilakukan melalui metode *cross validation* untuk menilai tingkat kesesuaian antara hasil prediksi model IDW dan data

pengukuran lapangan. Hasil evaluasi pada Tabel 4.8 menunjukkan bahwa seluruh parameter memiliki nilai *Mean Error* (ME) yang relatif mendekati nol. Kondisi ini mengindikasikan bahwa model tidak menunjukkan kecenderungan bias yang kuat dalam menghasilkan prediksi yang terlalu tinggi maupun terlalu rendah. Namun demikian, nilai *Root Mean Square Error* (RMSE) yang diperoleh menunjukkan adanya perbedaan tingkat akurasi antar parameter. RMSE menggambarkan besarnya penyimpangan antara nilai prediksi dan nilai hasil pengukuran, sehingga semakin kecil nilainya maka semakin dekat hasil interpolasi terhadap kondisi aktual di lapangan.

Berikut hasil *cross validation* interpolasi IDW disajikan pada Tabel 4. 8 dan Tabel 4. 9 di bawah ini.

Tabel 4. 8 Hasil Statistik *Cross Validation* Interpolasi IDW

Parameter	Count	Mean Error	Root Mean Square Error (RMSE)
Cd	8	0.000402	0.004101
Ph	8	0.046746	0.500434
Suhu	8	0.015393	0.539239
TDS	8	7.434901	46.772574
EC	8	11.663187	72.421522

Tabel 4. 9 Hasil *Cross Validation* Konsentrasi Kadmium (Cd)

Titik	Measured	Predicted	Error
S1	0.00086	0.00226	0.00140
S2	0.00056	0.00289	0.00233
S3	0.00046	0.00426	0.00380
S4	0.00073	0.00338	0.00265
S5	0.01075	0.00066	-0.01
S6	0.00078	0.00249	0.00170
S7	0.00104	0.00160	0.00056
S8	0.00065	0.00152	0.00087

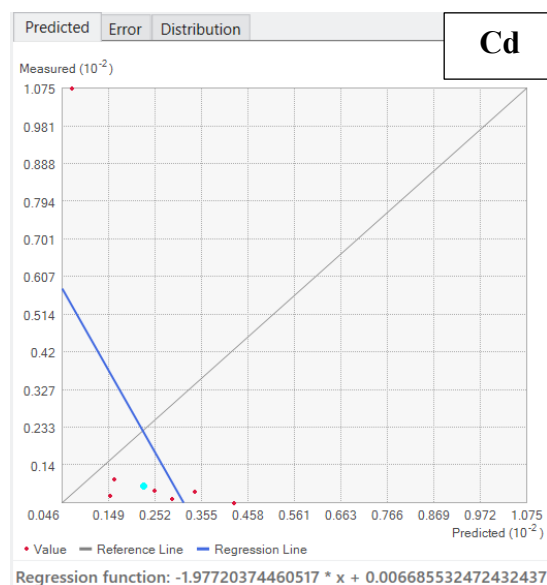
Pada parameter Cd diperoleh nilai RMSE sebesar 0,004101 mg/L dengan *Mean Error* sebesar 0,000402 mg/L. Meskipun nilai tersebut menunjukkan bahwa model masih mampu menggambarkan kecenderungan distribusi Cd secara umum,

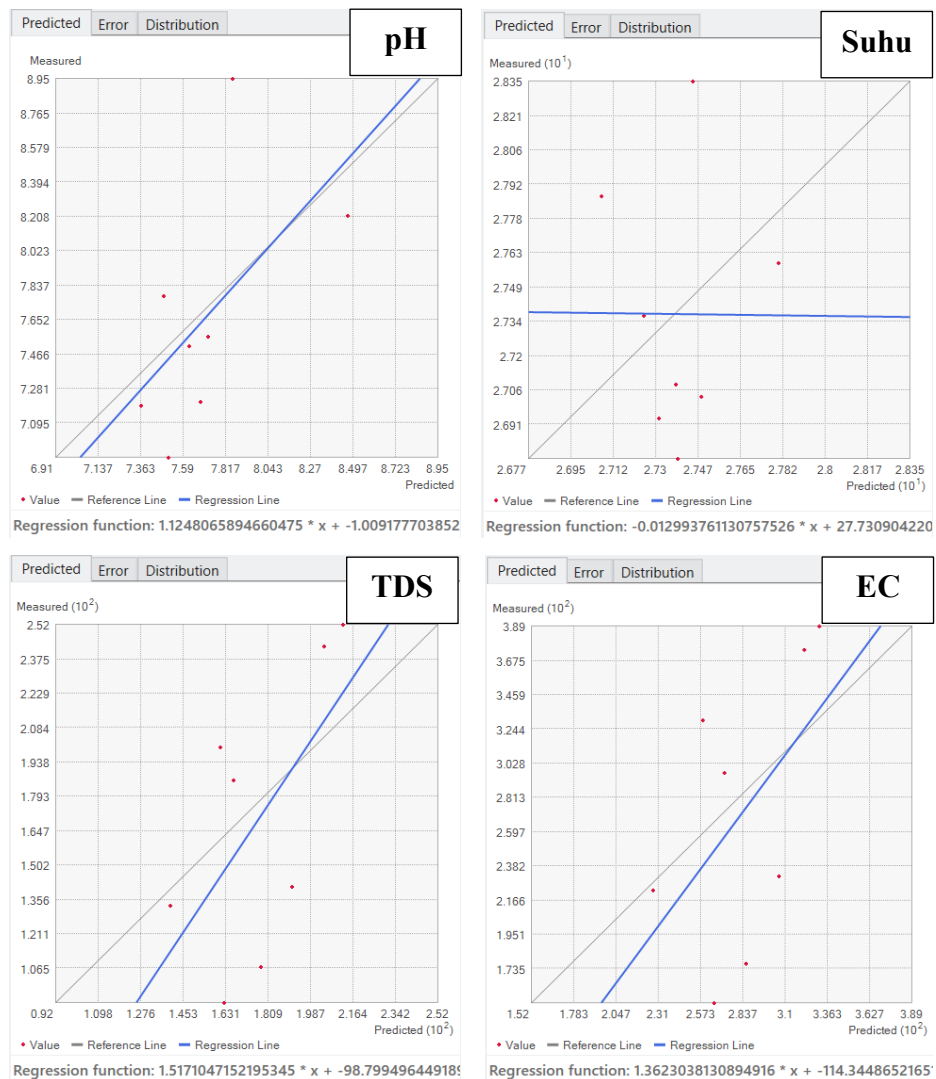
hasil cross validation pada Tabel 4.9 memperlihatkan adanya penyimpangan prediksi yang cukup besar pada titik S5 sebagai lokasi *hotspot*. Nilai konsentrasi hasil pengukuran pada titik tersebut jauh lebih tinggi dibandingkan hasil prediksi model, sehingga menunjukkan bahwa keberadaan *hotspot* bersifat sangat lokal dan tidak sepenuhnya dapat direpresentasikan oleh proses perataan spasial yang digunakan dalam metode IDW. Kondisi ini mengindikasikan bahwa distribusi Cd pada wilayah penelitian bersifat heterogen dan dipengaruhi oleh faktor lingkungan yang spesifik pada lokasi tertentu.

Berdasarkan hasil evaluasi tersebut, model IDW pada penelitian ini lebih tepat digunakan untuk menggambarkan pola umum distribusi spasial Cd dibandingkan untuk melakukan prediksi konsentrasi secara presisi pada setiap lokasi. Keberadaan satu *hotspot* dengan konsentrasi yang jauh lebih tinggi dibandingkan titik lainnya menyebabkan ketidakpastian prediksi meningkat pada area sekitar *hotspot*. Selain itu, jumlah titik sampling yang relatif terbatas turut memengaruhi kemampuan model dalam menangkap variasi spasial secara rinci. Oleh karena itu, hasil interpolasi yang diperoleh perlu diinterpretasikan sebagai representasi kecenderungan distribusi Cd pada wilayah penelitian dan bukan sebagai nilai prediksi absolut pada setiap lokasi.

1. Grafik *Predicted*

Dapat dilihat pada Gambar 4. 18 merupakan perbandingan grafik *Predicted* yang didapatkan dari hasil *Cross Validation* metode *Inverse Distance Weighting* (IDW).





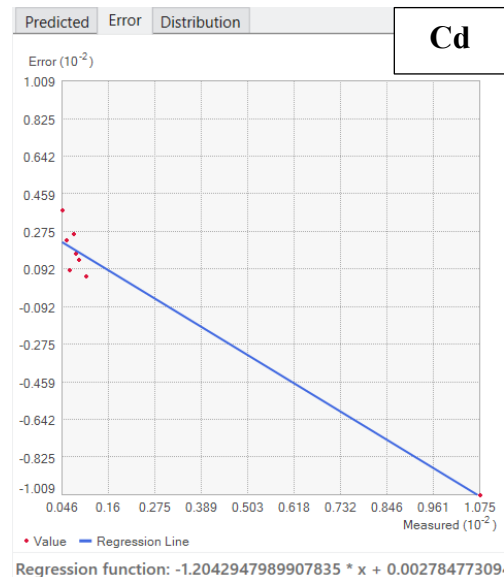
Gambar 4. 18 Perbandingan Grafik *Predicted Cross Validation* dari Setiap Parameter

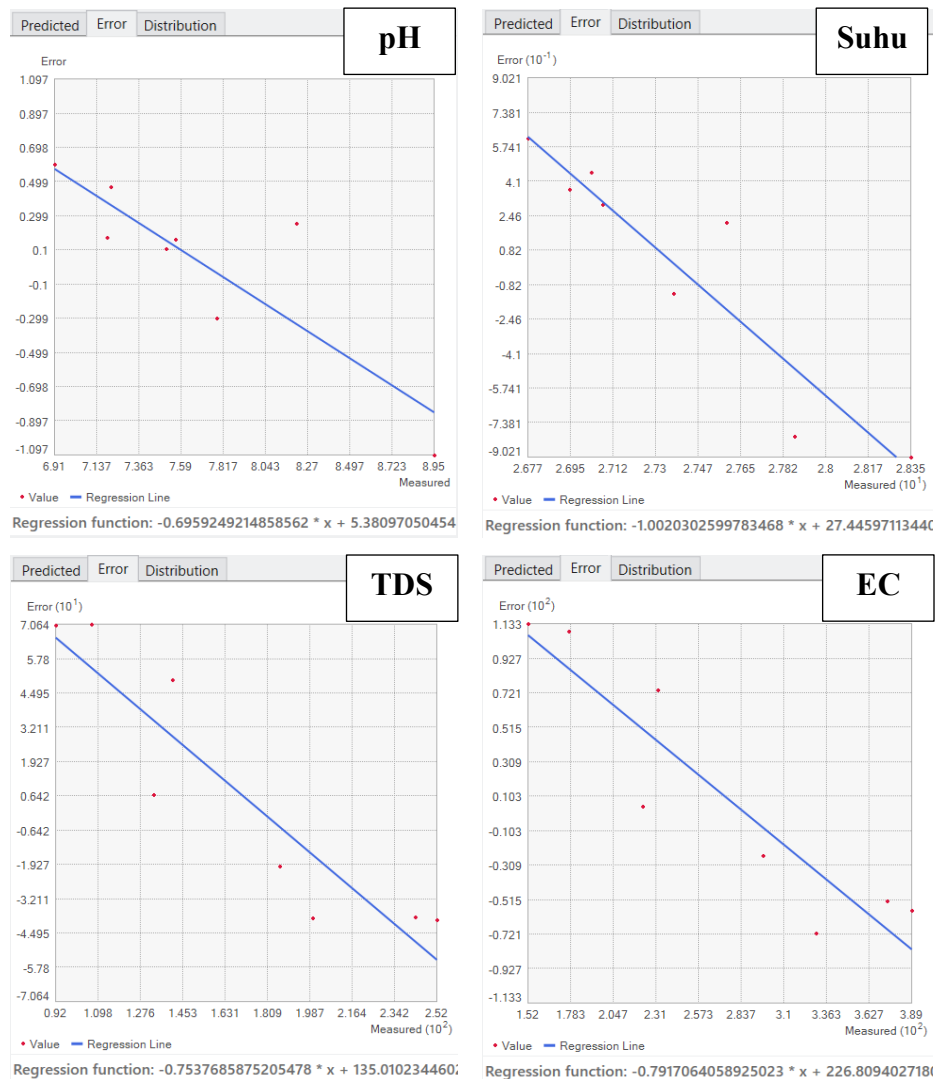
Grafik *predicted* pada Gambar 4.18 digunakan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian antara nilai hasil pengukuran lapangan (*measured*) dan nilai hasil prediksi model interpolasi IDW (*predicted*). Tingkat kesesuaian model dapat diamati dari kedekatan sebaran titik terhadap garis referensi, dimana semakin dekat posisi titik terhadap garis tersebut maka semakin kecil perbedaan antara hasil prediksi dan hasil pengukuran. Berdasarkan Gambar 4.18, parameter pH menunjukkan pola yang paling mendekati garis referensi dibandingkan parameter lainnya, sedangkan parameter TDS dan EC masih memperlihatkan kecenderungan yang cukup baik meskipun terdapat beberapa titik yang menyimpang. Kondisi ini menunjukkan bahwa model IDW relatif mampu merepresentasikan pola distribusi parameter yang memiliki variasi spasial lebih homogen pada wilayah penelitian.

Berbeda dengan parameter in situ, grafik *predicted* untuk Cd menunjukkan penyimpangan yang lebih besar terhadap garis referensi. Kondisi tersebut terutama dipengaruhi oleh keberadaan titik S5 sebagai *hotspot* dengan konsentrasi Cd yang jauh lebih tinggi dibandingkan titik sampling lainnya. Perbedaan yang besar antara nilai hasil pengukuran dan hasil prediksi pada titik tersebut menyebabkan kemampuan model dalam merepresentasikan variasi spasial Cd menjadi menurun. Temuan ini mengindikasikan bahwa distribusi Cd pada wilayah penelitian bersifat heterogen dan dipengaruhi oleh faktor lokal yang kuat, sehingga hasil interpolasi lebih tepat digunakan untuk menggambarkan kecenderungan pola distribusi spasial dibandingkan untuk memprediksi nilai konsentrasi Cd secara presisi pada setiap lokasi.

2. Grafik *Error*

Dapat dilihat pada Gambar 4. 19 merupakan perbandingan grafik *Error* yang didapatkan dari hasil *Cross Validation* metode *Inverse Distance Weighting* (IDW).





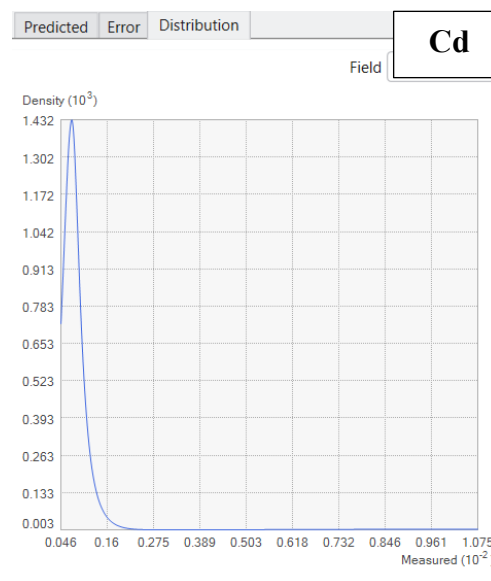
Gambar 4. 19 Perbandingan Grafik *Error Cross Validation* dari Setiap Parameter

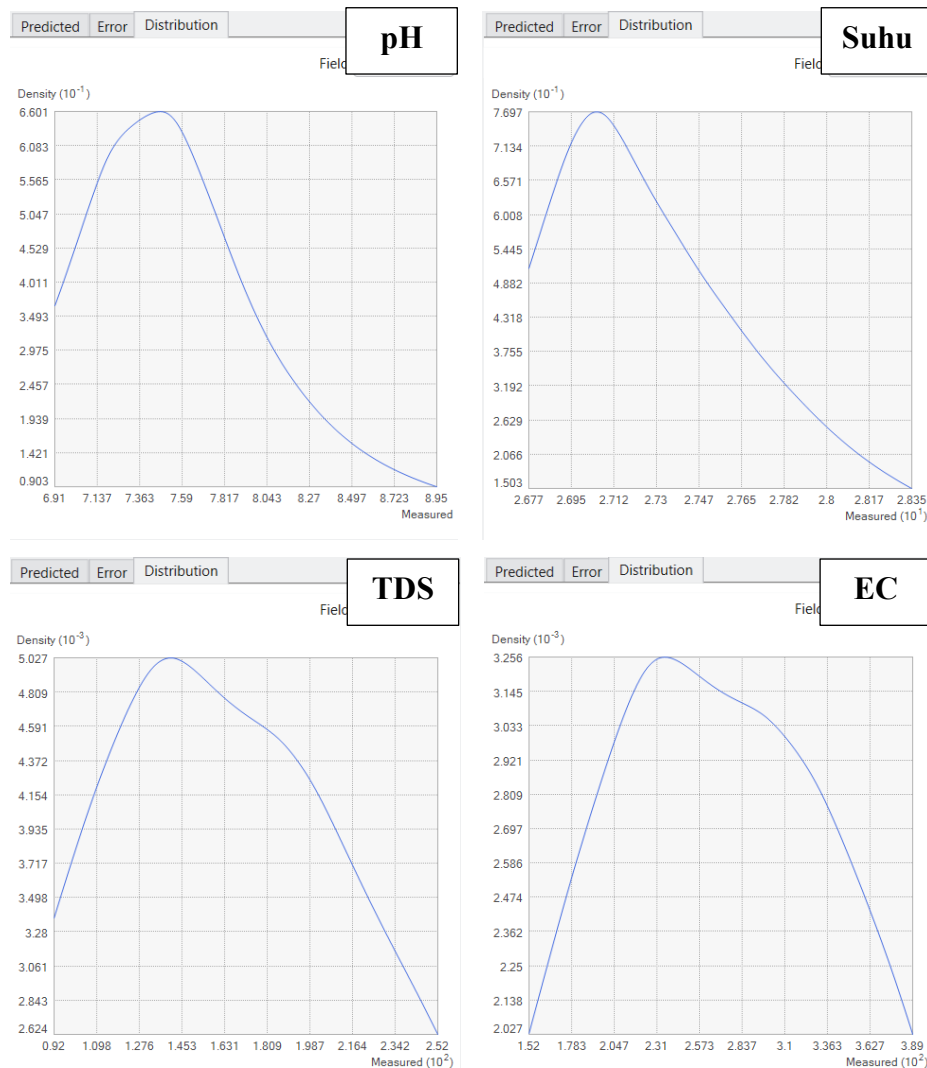
Grafik *error* pada Gambar 4.19 digunakan untuk mengevaluasi besarnya penyimpangan antara nilai hasil prediksi model interpolasi dan nilai hasil pengukuran lapangan pada setiap parameter. Secara umum, model yang baik akan menghasilkan nilai *error* yang tersebar di sekitar nol tanpa menunjukkan pola tertentu. Berdasarkan Gambar 4.15, parameter pH dan suhu menunjukkan sebaran error yang relatif kecil dan cenderung berada di sekitar garis nol, yang mengindikasikan bahwa model IDW mampu merepresentasikan kondisi aktual dengan tingkat penyimpangan yang rendah. Sementara itu, parameter TDS dan EC memperlihatkan variasi *error* yang lebih besar, namun masih menunjukkan pola yang relatif seimbang antara nilai positif dan negatif sehingga tidak mengindikasikan adanya kecenderungan bias prediksi yang dominan.

Berbeda dengan parameter lainnya, grafik *error* Cd menunjukkan adanya satu penyimpangan yang jauh lebih besar dibandingkan titik pengamatan lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa kesalahan prediksi model terutama dipengaruhi oleh keberadaan *hotspot* Cd pada titik S5 yang memiliki konsentrasi jauh lebih tinggi dibandingkan titik sampling lain. Akibatnya, model IDW mengalami kesulitan dalam merepresentasikan perubahan konsentrasi yang bersifat sangat lokal dan kontras terhadap kondisi di sekitarnya. Temuan ini memperkuat hasil evaluasi pada Tabel 4.9 dan grafik predicted sebelumnya, dimana distribusi Cd pada wilayah penelitian cenderung heterogen dan dipengaruhi oleh faktor lokal yang kuat, sehingga ketidakpastian prediksi meningkat pada area sekitar *hotspot* dibandingkan wilayah lainnya.

3. Grafik *Distribution*

Dapat dilihat pada Gambar 4. 20 merupakan perbandingan grafik *Distribution* yang didapatkan dari hasil *Cross Validation* metode *Inverse Distance Weighting* (IDW).





Gambar 4. 20 Perbandingan Grafik *Distribution Cross Validation* dari Setiap Parameter

Grafik distribution pada Gambar 4.20 digunakan untuk menggambarkan pola sebaran nilai hasil pengukuran pada masing-masing parameter yang digunakan dalam proses interpolasi. Bentuk distribusi data dapat memberikan informasi mengenai tingkat homogenitas data serta keberadaan nilai yang menyimpang dari pola umum pengamatan. Berdasarkan Gambar 4.20, parameter pH dan suhu menunjukkan distribusi yang relatif terpusat pada rentang nilai tertentu, yang mengindikasikan bahwa variasi antar titik sampling cenderung rendah dan kondisi air tanah pada wilayah penelitian relatif homogen. Sementara itu, parameter TDS dan EC memperlihatkan distribusi yang lebih menyebar, yang menunjukkan adanya variasi kandungan ion dan zat terlarut antar lokasi akibat perbedaan karakteristik hidrogeokimia air tanah.

Berbeda dengan parameter lainnya, distribusi Cd menunjukkan pola yang tidak merata dengan kecenderungan menceng ke arah konsentrasi rendah dan memiliki satu nilai yang jauh lebih tinggi dibandingkan sebagian besar data lainnya. Pola tersebut mengindikasikan adanya *hotspot* lokal yang menyebabkan distribusi Cd menjadi heterogen pada wilayah penelitian. Keberadaan nilai ekstrem tersebut berpengaruh terhadap hasil *cross validation* karena meningkatkan penyimpangan antara nilai hasil pengukuran dan hasil prediksi model interpolasi. Temuan ini konsisten dengan hasil pada Tabel 4.9 serta grafik *predicted* dan *error* sebelumnya, dimana titik S5 menunjukkan karakteristik yang berbeda dibandingkan titik sampling lainnya. Dengan demikian, distribusi Cd pada wilayah penelitian lebih mencerminkan pengaruh faktor lokal yang bersifat spesifik dibandingkan pola kualitas air tanah yang terbentuk secara regional.

4. 5. 5 Interpretasi Kelayakan dan Keterbatasan Model

Berdasarkan hasil evaluasi statistik pada Tabel 4.8 dan Tabel 4.9 serta hasil validasi melalui grafik *predicted*, *error*, dan *distribution* pada Gambar 4.18 hingga Gambar 4.20, metode interpolasi *Inverse Distance Weighting* (IDW) masih dapat digunakan untuk menggambarkan kecenderungan distribusi spasial kualitas air tanah pada wilayah penelitian. Nilai *Mean Error* yang relatif mendekati nol menunjukkan bahwa model tidak memiliki kecenderungan bias prediksi yang kuat, sedangkan pola sebaran pada grafik *predicted* memperlihatkan bahwa sebagian besar parameter in situ masih dapat direpresentasikan dengan baik oleh model interpolasi. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa model IDW mampu menangkap pola umum variasi spasial yang terjadi pada wilayah penelitian, khususnya untuk parameter yang memiliki distribusi relatif homogen seperti pH dan suhu.

Meskipun demikian, tingkat keandalan model untuk parameter Kadmium (Cd) menunjukkan kondisi yang berbeda dibandingkan parameter in situ. Hasil *cross validation* pada Tabel 4.9 menunjukkan adanya penyimpangan prediksi yang cukup besar pada titik S5 sebagai lokasi *hotspot* Cd. Temuan tersebut didukung oleh grafik *predicted* yang memperlihatkan hubungan yang lemah antara nilai hasil pengukuran dan hasil prediksi, serta grafik *error* yang menunjukkan adanya penyimpangan yang lebih besar pada konsentrasi Cd dibandingkan parameter

lainnya. Selain itu, grafik distribution menunjukkan bahwa distribusi Cd bersifat tidak homogen karena sebagian besar titik sampling memiliki konsentrasi rendah, sedangkan satu titik memiliki konsentrasi yang jauh lebih tinggi dibandingkan titik lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa distribusi Cd pada wilayah penelitian dipengaruhi oleh faktor lokal yang kuat sehingga membentuk pola spasial yang lebih kompleks dibandingkan parameter kualitas air tanah lainnya.

Keterbatasan model juga dipengaruhi oleh jumlah titik sampling yang relatif terbatas serta keberadaan nilai ekstrem pada titik S5. Pada metode IDW, nilai prediksi suatu lokasi sangat dipengaruhi oleh nilai titik di sekitarnya sehingga keberadaan *hotspot* lokal yang kontras terhadap lingkungan sekitarnya dapat meningkatkan ketidakpastian hasil interpolasi. Akibatnya, model cenderung lebih mampu menggambarkan pola umum persebaran Cd dibandingkan merepresentasikan konsentrasi secara presisi pada setiap lokasi. Oleh karena itu, hasil interpolasi pada penelitian ini lebih tepat digunakan sebagai dasar untuk mengidentifikasi kecenderungan distribusi spasial dan keberadaan zona yang berpotensi mengalami peningkatan konsentrasi Cd, bukan sebagai representasi nilai aktual pada seluruh area penelitian.

4.6 Rekomendasi Pengelolaan Air Tanah terhadap Potensi Pencemaran Kadmium (Cd)

Hasil penelitian menunjukkan bahwa distribusi Kadmium (Cd) pada air tanah di wilayah penelitian memiliki pola yang tidak homogen dan cenderung dipengaruhi oleh kondisi lingkungan lokal pada setiap titik sampling. Keberadaan *hotspot* Cd pada titik S5 menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi logam berat tidak selalu diikuti oleh perubahan parameter kualitas air tanah secara umum, melainkan lebih berkaitan dengan aktivitas penggunaan lahan dan proses *transport* logam pada lingkungan bawah permukaan. Oleh karena itu, upaya pengelolaan air tanah perlu diarahkan tidak hanya pada pengendalian kualitas air, tetapi juga pada pengelolaan sumber pencemar potensial di wilayah tangkapan air tanah secara berkelanjutan.

4. 6. 1 Monitoring Kualitas Air Tanah pada Area Prioritas

Hasil penelitian menunjukkan bahwa distribusi Kadmium (Cd) pada air tanah membentuk pola yang tidak merata dengan konsentrasi tertinggi ditemukan pada area *hotspot* di sekitar titik S5. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pengelolaan kualitas air tanah lebih efektif dilakukan melalui pendekatan berbasis area prioritas dibandingkan pemantauan yang dilakukan secara seragam pada seluruh wilayah. Area yang memiliki konsentrasi Cd relatif tinggi perlu menjadi fokus monitoring untuk mendeteksi perubahan kualitas air tanah secara lebih dini serta mengevaluasi perkembangan tingkat pencemaran dari waktu ke waktu.

Pelaksanaan monitoring secara berkala penting dilakukan karena hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi Cd tidak selalu diikuti oleh perubahan parameter kualitas air seperti pH, suhu, EC, dan TDS. Dengan demikian, pengujian logam berat secara langsung perlu menjadi bagian dari program pemantauan kualitas air tanah di kawasan sekitar Rawa Pening. Penelitian mengenai kualitas air tanah di kawasan permukiman juga merekomendasikan pengawasan kualitas air secara periodik sebagai langkah pengendalian pencemaran dan perlindungan kesehatan masyarakat (Agustin *et al.*, 2025; Nadhifah & Hariyanto, 2025). Pendekatan ini sejalan dengan kajian kualitas lingkungan Rawa Pening yang menunjukkan bahwa aktivitas penggunaan lahan dan tekanan lingkungan berpotensi memengaruhi kondisi sumber daya air secara berkelanjutan (Piranti *et al.*, 2018).

4. 6. 2 Pengelolaan Penggunaan Lahan Pertanian Secara Berkelanjutan

Analisis distribusi spasial menunjukkan bahwa pola sebaran Cd memiliki keterkaitan dengan penggunaan lahan di sekitar lokasi penelitian. Keberadaan *hotspot* pada area yang didominasi lahan pertanian mengindikasikan bahwa aktivitas pertanian yang berlangsung dalam jangka panjang berpotensi berkontribusi terhadap akumulasi Cd pada lingkungan. Oleh karena itu, pengelolaan penggunaan lahan pertanian perlu diarahkan pada penerapan praktik budidaya yang lebih berkelanjutan melalui penggunaan pupuk organik, hingga penggunaan pupuk secara tepat serta sesuai kebutuhan lahan hingga penggunaan (Agustin *et al.*, 2025; Prihandarini, 2023).

Penerapan pengelolaan pertanian yang lebih terkendali dapat mengurangi potensi akumulasi logam berat pada tanah sehingga risiko perpindahan Cd menuju

air tanah melalui proses infiltrasi dan perkolasi dapat ditekan. Rekomendasi ini didukung oleh penelitian yang menjelaskan bahwa penggunaan pupuk fosfat secara terus-menerus berpotensi meningkatkan akumulasi Cd pada lahan pertanian dan memengaruhi kualitas lingkungan dalam jangka panjang (Sutrisno & Kuntastyuti, 2015).

4. 6. 3 Perlindungan Daerah Resapan dan Sumber Air Tanah

Wilayah penelitian berada pada kawasan dataran rendah sekitar Rawa Pening yang memiliki keterkaitan erat antara aktivitas penggunaan lahan, proses infiltrasi, dan sistem air tanah dangkal. Kondisi tersebut menyebabkan bahan pencemar yang berada di permukaan berpotensi mengalami *transport* menuju akuifer melalui proses infiltrasi dan perkolasi. Oleh karena itu, perlindungan daerah resapan perlu menjadi bagian penting dalam upaya menjaga kualitas air tanah di wilayah penelitian (Aryanto & Hardiman, 2017).

Upaya yang dapat dilakukan meliputi pengendalian aktivitas yang berpotensi menghasilkan akumulasi bahan pencemar pada area resapan, konservasi lahan di sekitar sumber air, serta pengelolaan lingkungan yang mempertimbangkan keberlanjutan fungsi hidrologi kawasan. Pendekatan ini sejalan dengan kajian lingkungan Rawa Pening yang menunjukkan bahwa perubahan penggunaan lahan dan tekanan aktivitas manusia berpengaruh terhadap kondisi lingkungan dan kualitas sumber daya air di kawasan tersebut (Piranti *et al.*, 2018).

4. 6. 4 Pengelolaan Lingkungan dan Edukasi Masyarakat

Kondisi alami wilayah sekitar Rawa Pening juga perlu dipertimbangkan dalam pengelolaan kualitas air tanah. Karakteristik dataran rendah, interaksi antara air tanah dengan air permukaan, serta keberadaan sedimen rawa memungkinkan terjadinya perpindahan unsur terlarut ke dalam sistem air tanah melalui proses infiltrasi dan pergerakan air bawah permukaan. Penelitian terkait kandungan logam berat dalam air tanah menunjukkan bahwa keberadaan logam berat pada air tanah dapat dipengaruhi oleh kombinasi faktor lingkungan alami dan aktivitas manusia di sekitar wilayah penelitian (Yusuf, 2021). Oleh sebab itu, pengelolaan kualitas air tanah di sekitar Rawa Pening perlu dilakukan secara menyeluruh dengan mempertimbangkan kondisi hidrogeologi, karakteristik lingkungan, dan aktivitas masyarakat di sekitarnya.

Di samping faktor alami, pengendalian aktivitas masyarakat di sekitar wilayah penelitian juga menjadi bagian penting dalam menjaga kualitas air tanah. Aktivitas domestik, peningkatan kepadatan permukiman, serta pola penggunaan lahan dapat mempengaruhi kondisi kualitas air tanah melalui masuknya bahan pencemar ke dalam sistem akuifer. Penelitian mengenai distribusi pencemaran limbah domestik dalam air tanah menunjukkan bahwa peningkatan aktivitas manusia dan kepadatan penduduk dapat memperbesar potensi pencemaran apabila tidak disertai pengelolaan lingkungan yang memadai (Habibi & Anna, 2022). Oleh karena itu, diperlukan peningkatan kesadaran masyarakat mengenai pentingnya menjaga sanitasi lingkungan, pengelolaan limbah rumah tangga, dan perlindungan sumber air tanah sebagai sumber air bersih masyarakat.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil analisis laboratorium menggunakan metode *Inductively Coupled Plasma–Mass Spectrometry* (ICP-MS) menunjukkan bahwa konsentrasi kadmium (Cd) pada air tanah di wilayah penelitian berada pada kisaran 0,00046-0,01075 mg/L. Sebagian besar sampel masih memenuhi baku mutu yang ditetapkan dalam Permenkes Nomor 2 Tahun 2023, sedangkan titik S5 merupakan satu-satunya lokasi yang memiliki konsentrasi Cd melebihi nilai ambang batas. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kualitas air tanah di wilayah penelitian secara umum masih tergolong baik, namun terdapat indikasi pencemaran yang bersifat lokal pada titik tertentu.
2. Analisis distribusi spasial menggunakan metode *Inverse Distance Weighting* (IDW) memperlihatkan bahwa penyebaran konsentrasi Cd tidak berlangsung secara merata, melainkan membentuk *hotspot* pada area di sekitar titik S5. Walaupun jumlah titik sampling relatif terbatas, hasil interpolasi masih mampu memberikan gambaran mengenai kecenderungan distribusi spasial Cd sehingga dapat dimanfaatkan sebagai informasi awal dalam mengidentifikasi wilayah yang berpotensi mengalami pencemaran.
3. Pola distribusi Cd pada air tanah menunjukkan kecenderungan berkaitan dengan karakteristik penggunaan lahan dan aktivitas yang berkembang di sekitar titik sampling. Di sisi lain, parameter *in situ* yang meliputi pH, suhu, EC, dan TDS hanya menunjukkan hubungan yang lemah terhadap variasi konsentrasi Cd. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa perubahan konsentrasi Cd di wilayah penelitian lebih dipengaruhi oleh mekanisme akumulasi dan transport logam, serta lebih berkaitan dengan faktor lingkungan lokal dan penggunaan lahan dibandingkan perubahan karakteristik umum kualitas air tanah.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, saran yang diberikan peneliti sebagai berikut :

1. Penelitian selanjutnya disarankan menambah jumlah dan sebaran titik sampling agar hasil analisis spasial distribusi logam berat Cd dapat merepresentasikan kondisi wilayah penelitian secara lebih detail dan akurat.
2. Perlu dilakukan pengujian parameter kualitas air tambahan, seperti logam berat lainnya maupun parameter kimia pendukung, untuk memperoleh informasi yang lebih komprehensif mengenai kondisi kualitas air tanah di kawasan sekitar Rawa Pening.
3. Penelitian lanjutan disarankan menggunakan metode interpolasi dan analisis statistik spasial lainnya sebagai pembanding untuk meningkatkan evaluasi ketelitian model distribusi spasial kualitas air tanah.
4. Masyarakat di sekitar wilayah penelitian perlu meningkatkan kesadaran terhadap pentingnya perlindungan sumber air tanah melalui pengelolaan aktivitas penggunaan lahan yang berkelanjutan, pemeliharaan kondisi sumur, pengelolaan sanitasi lingkungan, serta pengendalian potensi sumber pencemar pada area pertanian guna mengurangi risiko penurunan kualitas air tanah.
5. Pemerintah daerah dan instansi terkait diharapkan dapat melakukan pemantauan kualitas air tanah secara berkala, khususnya pada wilayah yang terindikasi memiliki *hotspot* konsentrasi Cd, guna mencegah potensi penurunan kualitas air tanah di masa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- Achmad, R. 2004. Kimia Lingkungan Edisi 1. Andi Offset :Yogyakarta.
- Agustin, Y. S., Syahrani, L. P. W., Taqwim, M. H. A., Arlysia, V., & Herbowo, A. C. F. (2025). Kandungan Kadmium (Cd) pada Jenis Beras C4 Super, C4 Raja, Mentik, dan Rojolele. *ENVIRO: Journal of Tropical Environmental Research*, 26(2), 59-67.
- Amalia, A. V., Fariz, T. R., Jabbar, A., Haris, A., Rahmawati, D., Sultan, H., ... & Arifah, E. Z. (2023). Kondisi Lingkungan Danau Rawa Pening. *Bookchapter Alam Universitas Negeri Semarang*, (3), 123-148.
- Aprilliani, D. (2026). Mahasiswa Tugas Akhir Pemetaan Sebaran Kandungan Nitrat (NO₃) pada Air Tanah di Sekitar Dataran Rendah Rawa Pening, Kabupaten Semarang. *Personal Communication*.
- Aryanto, D. E., & Hardiman, G. (2017). Kajian Multi Varian Faktor yang Berpengaruh terhadap Infiltrasi Air Tanah sebagai Dasar Penentuan Daerah Potensial Resapan Air Tanah. In *Proceeding Biology Education Conference: Biology, Science, Enviromental, and Learning* (Vol. 14, No. 1, pp. 252-257).
- ESRI. 2011. How *Kriging* Works.
- FEBRIANTI, N. (2019). Analisis Kandungan Logam Berat (Pb, Cd, Fe, Cu) Pada Airtanah di Rawa Pening Kabupaten Semarang Jawa Tengah (*Doctoral dissertation*, Universitas Islam Indonesia).
- Habibi, A. N., & Anna, A. N. (2022). Distribusi Pencemaran Limbah Domestik dalam Air Tanah di Kecamatan Pasar Kliwon Kota Surakarta. *Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta*.
- Hadi, B. S. (2013). Metode Interpolasi Spasial Dalam Studi Geografi (Ulasan Singkat dan Contoh Aplikasinya). *Geomedia Majalah Ilmiah dan Informasi Kegeografian*, 11(2).

- Hamdi, F., & Kurniawan, A. (2018). Identifikasi dan Pemetaan Kualitas Air Tanah di Kota Surabaya. *Diss. institut Teknologi Sepuluh Nopember*.
- Heriza, D., Sukmono, A., & Bashit, N. (2018). Analisis Perubahan Kualitas Perairan Danau Rawa Pening Periode 2013, 2015 dan 2017 dengan Menggunakan Data Citra Landsat 8 Multitemporal. *Jurnal Geodesi Undip*, 7(1), 79-89.
- Hidayah, A. M. (2012). Kandungan Logam Berat Pada Air, Sedimen dan Ikan Nila (*Oreochromis Niloticus Linn.*) di Karamba Danau Rawapening. in *Seminar Nasional Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*.
- Hidayah, A. M., Purwanto, P., & Soeprbowati, T. R. (2014). Biokonsentrasi Faktor Logam Berat Pb, Cd, Cr Dan Cu Pada Ikan Nila (*Oreochromis niloticus Linn.*) di Karamba Danau Rawa Pening. *Bioma: Berkala Ilmiah Biologi*, 16(1), 1-9.
- Irawan, D. E., Puradimaja, D. J., Yeni, D., Kuntoro, A. A., & Julian, M. M. (2016). Decreasing groundwater quality at Cisadane riverbanks: groundwater-surface water approach. *arXiv preprint arXiv:1603.09380*.
- Kodoatie, R. J. (2021). Tata Ruang Air Tanah. *Penerbit Andi*.
- Mardiatno, D., Faridah, F., Listyaningrum, N., Hastari, N. R. F., Rhosadi, I., da Costa, A. D. S., ... & Setiawan, M. A. (2023). A holistic review of lake Rawapening management practices, Indonesia: Pillar-based and object-based management. *Water*, 15(1), 39.
- Melliana, N. M. M. S. (2023). Studi Analisis Perbandingan Hasil Prediksi Beragam Metode interpolasi Spasial Pada intrusi Air Laut Di Kelurahan Kota Karang, Bandar Lampung.
- Muna, A. M., Rahman, A., Jundullah, N. I., Hayati, M. N., Aulia, N. M., & Senno, S. B. (2025). Distribusi Spasial dan Temporal Eceng Gondok di Danau Rawa Pening. *Jurnal Akuatiklestari*, 8(2), 169-175.

- Nadhifah, S. L., & Hariyanto, B. (2025). Analisis Kualitas Air Tanah di Kelurahan Jemur Wonosari, Kecamatan Wonocolo, Kota Surabaya, Provinsi Jawa Timur. *Swara Bhumi*, 1(1).
- Pakpahan, I., & Guchi, H. (2019). Pemetaan Kandungan P-Tersedia, P-Total dan Logam Berat Kadmium pada Lahan Sawah di Desa Pematang Nibung Kecamatan Medang Deras Kabupaten Batu Bara: Mapping of P-Available Content, P-Total and Cadmium in Paddy Fields of Pematang Nibung Village Medang Deras District, Batu Bara Regency. *JURNAL AGROTEKNOLOGI*, 7(2), 448-457.
- Palar, H. 2004. Pencemaran dan Toksikologi Logam Berat. Jakarta: *PT.Rineka Cipta*.
- Parubak, A. S., Rombe, Y. P., Surbakti, P. S., Larasati, C. N., Yogaswara, R., Anwar, A., ... & Lidiawati, D. (2023). Identifikasi Logam Berat Pb dan Cd pada Air Sumur di Kampung Bugis Wosi Papua Barat.
- Piranti, A. S., Rahayu, D. R. U. S., & Waluyo, G. (2018). Evaluasi Status Mutu Air Danau Rawapening. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam Dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)*, 8(2), 151-160.
- Piranti, A., Waluyo, G., & Rahayu, D. R. (2019). The Possibility of Using Lake Rawa Pening as a Source of Drinking Water. *Journal of Water and Land Development*.
- Pramono, G. H. (2008). Akurasi Metode IDW Dan *Kriging* Untuk Interpolasi Sebaran Sedimen Tersuspensi di Maros, Sulawesi Selatan. in *Forum geografi* (Vol. 22, No. 2, pp. 145-158).
- Prihandarini, R. (2023). Kapita selekta pertanian organik dan pertanian ramah lingkungan. *Penerbit A-Empat*.
- Puspitarini, R., Ismawati, R., & Mizana, M. W. (2023). Studi Penyebaran Logam Berat Timbal Dan Kadmium Air Lindi Dan Air Sumur Di Tpa Pasuruhan

- Kabupaten Magelang. *Jurnal Sains dan Teknologi Lingkungan*, 15(2), 134-145.
- Qadriyah, L., Moelyaningrum, A. D., & Ningrum, P. T. (2019). Kadar kadmium pada air sumur gali disekitar tempat pemrosesan akhir sampah (Studi di Tempat Pemrosesan Akhir Sampah X Kabupaten Jember, Indonesia). *BIOLINK (Jurnal Biologi Lingkungan Industri Kesehatan)*, 6(1), 41-49.
- Rafsanjani, S. E. (2021). Analisis Kualitas Air Tanah Terhadap Keberadaan Ipal Komunal Dengan Metode Inverse Distance Weighting (Idw) Kecamatan Depok Dan Mlati, Yogyakarta.
- Razi, M. H., Wilopo, W., & Putra, D. P. E. (2024). Hydrogeochemical evolution and water–rock interaction processes in the multilayer volcanic aquifer of Yogyakarta-Sleman Groundwater Basin, Indonesia. *Environmental Earth Sciences*, 83(6), 164.
- Rusydi, A. F. (2018). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. In *IOP conference series: earth and environmental science* (Vol. 118, No. 1, p. 012019). IOP publishing.
- Sudarmaji, S., Mukono, J., & Prasasti, C. I. (2006). Toksikologi Logam Berat B3 dan Dampaknya terhadap kesehatan. *Jurnal Kesehatan Lingkungan Unair*, 2(2), 3956.
- Sutrisno, S., & Kuntastyuti, H. (2015). Pengelolaan cemaran kadmium pada lahan pertanian di Indonesia. *Buletin Palawija*, 13(1), 83-91.
- Sutrisno, T. (2002). Teknologi Penyediaan Air Bersih. Jakarta: Rineka Cipta.
- Syakuri, A. A. (2026). Mahasiswa Tugas Akhir Analisis Konsentrasi Logam Berat Kadmium (Cd) pada Profil Tanah Berdasarkan Karakteristik Tanah di Kawasan Pertanian Rawa Pening, Semarang, Jawa Tengah. *Personal Communication*.

- Wacano, D., Febrianti, N., & Ardhayanti, L. I. (2025). Analisis konsentrasi dan distribusi spasial logam berat dalam air tanah di sub DAS Galeh-torong, Jawa Tengah, Indonesia. *Jurnal Kesehatan Dan Pengelolaan Lingkungan*, 6(1), 21-28.
- Widodo, A. A., Purnaweni, H., & Kismartini, K. (2022). Analisis Peran (Balai Besar Wilayah Sungai) BBWS Pemali Juana dalam Pengelolaan Gulma Air. *Syntax Literate; Jurnal Ilmiah Indonesia*, 7(1), 44-52.
- Widowati, W., Sastiono, A., & Jusuf, R. (2008). Efek Toksik Logam Pencegahan dan Penanggulangan Pencemaran. *Yogyakarta: Penerbit Andi*, 36.
- Wihardjaka, A., & Harsanti, E. (2018). Konsentrasi Kadmium (Cd) Dalam Gabah Padi Dan Tanah Sawah Tadah Hujan Akibat Pemberian Pupuk Secara Rutin. *Jurnal Ecolab*.
- Winarmadani, S. (2019). Analisis Kandungan Logam Berat (Pb, Cd, Cu, Fe) pada Tanah di Rawapening Kabupaten Semarang Jawa Tengah (*Doctoral dissertation*, Universitas Islam Indonesia).
- World Health Organization. (2002). *Guidelines for drinking-water quality*. World Health Organization.
- Wulandari, S. S. (2022). Revitalization as a Regulatory Strategy in Rawa Pening Lake Management (Case Study in Dusun Sido Makmur, Sumber Rejo, Semarang Regency). *Endogami: Jurnal Ilmiah Kajian Antropologi*, 6(1), 16-31.
- Yasrebi, J., Saffari, M., Fathi, H., Karimian, N., Moazallahi, M., & Gazni, R. (2009). Evaluation and Comparison of Ordinary Kriging and Inverse Distance Weighting Methods for Prediction of Spatial Variability of Some Soil Chemical Parameters. *Research Journal of Biological Sciences* (Vol. 4, No. 1, pp. 93-102).
- Yudanegara, R. A., Astutik, D., Hernandi, A., Soedarmodjo, T. P., & Alexander, E. (2021). Penggunaan metode inverse distance weighted (IDW) untuk

pemetaan zona nilai tanah (studi kasus: kelurahan gedong meneng, Bandar Lampung). *Elipsoida: Jurnal Geodesi dan Geomatika*, 4(2), 85-90.

Yusuf, A. A. I. S. (2021). Analisis Kandungan Logam Berat Dalam Air Tanah Dari Area Pemukiman Warga Di Sekitar Pt. Kima Dengan Menggunakan Metode Atomic Absorption Spectrophotometry (AAS). In *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri (SNTI)* (Vol. 8, No. 1, pp. 358-361).

LAMPIRAN

Lampiran 1. Dokumentasi Pengambilan Sampel

No	Gambar	Keterangan
1		Pengambilan sampel dan pengujian parameter <i>in situ</i> di titik 1
2		Pengambilan sampel dan pengujian parameter <i>in situ</i> di titik 2
3		Pengambilan sampel dan pengujian parameter <i>in situ</i> di titik 3

4		Pengambilan sampel dan pengujian parameter <i>in situ</i> di titik 4
5		Pengambilan sampel dan pengujian parameter <i>in situ</i> di titik 5
6		Pengambilan sampel dan pengujian parameter <i>in situ</i> di titik 6
7		Pengambilan sampel dan pengujian parameter <i>in situ</i> di titik 7

8		Pengambilan sampel dan pengujian parameter <i>in situ</i> di titik 8
9		Kondisi eksisting beberapa titik

10		Kondisi beberapa titik sampling
----	--	---------------------------------

Lampiran 2. Titik Koordinat

Titik Sampel	Titik Koordinat	
	Lat	Long
S1	-7.275095°	110.373361°
S2	-7.292561°	110.372507°
S3	-7.297729°	110.401694°
S4	-7.288953°	110.409240°
S5	-7.287053°	110.395076°
S6	-7.264163°	110.388241°
S7	-7.267536°	110.411058°
S8	-7.260660°	110.418822°

Lampiran 3. Pengujian Sampel di Laboratorium

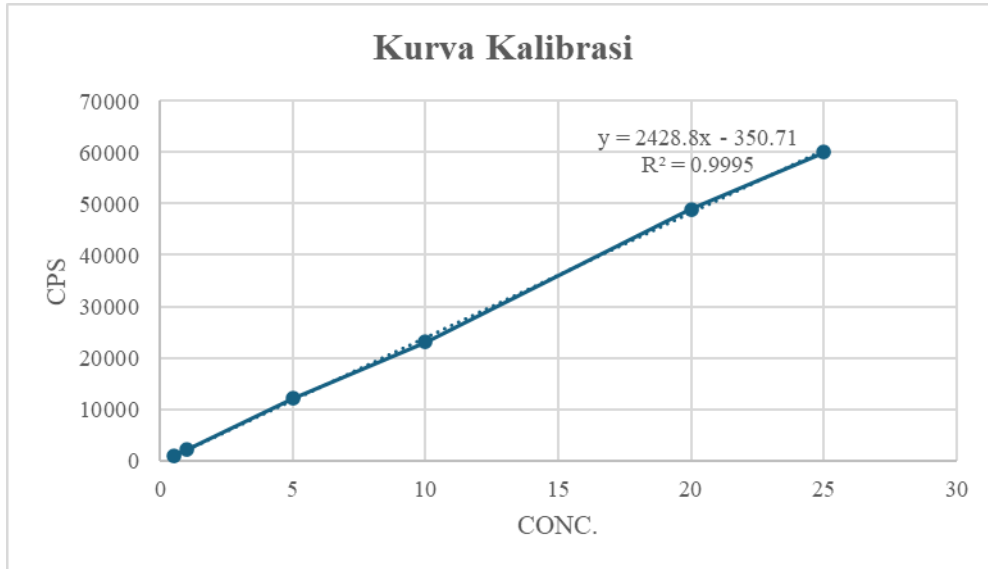
No	Gambar	Keterangan
1		Sampel duplo pengujian kadmium (Cd)
2		Pembacaan sampel dengan metode <i>Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry</i> (ICP-MS)

Lampiran 4. Kurva Kalibrasi

Larutan	Konsentrasi (ppb)	CPS
Std 0.5 ppb	0.5	950.09
Std 1 ppb	1	2063.62
Std 5 ppb	5	12119.56
Std 10 ppb	10	23131.33
Std 20 ppb	20	48982.44
Std 25 ppb	25	60018.47

Koefisien Relasi	0.99976
<i>Slope</i>	2428.77627
<i>Intersep</i>	-350.70506

Sy/x	604.162258
LOD	0.82088065
LOQ	2.48751714



Lampiran 5. Hasil Pengujian Parameter *In Situ* dan Kadmium (Cd)

No	Titik Sampel	Cd (mg/L)	pH	Suhu (°C)	EC (μs/cm)	EC (mg/L)	TDS (mg/L)
1	S1	0.00086	6.91	27.37	223	142.72	133
2	S2	0.00056	7.19	27.08	152	97.28	92
3	S3	0.00046	7.78	26.94	297	190.08	186
4	S4	0.00073	7.56	26.77	232	148.48	141
5	S5	0.01075	7.21	27.87	330	211.20	200
6	S6	0.00078	7.51	27.03	177	113.28	107
7	S7	0.00104	8.95	27.59	374	239.36	243
8	S8	0.00065	8.21	28.35	389	248.96	252
	<i>Average</i>	0.00198	7.67	27.38	272	173.92	169
	<i>Min</i>	0.00046	6.91	26.77	152	97.28	92
	<i>Max</i>	0.01075	8.95	28.35	389	248.96	252

Lampiran 6. Hasil pengujian Duplo Cd Setiap Titik Sampling

Titik	Duplo A (ppb)	Duplo B (ppb)	RPD (%)	Keterangan
S1	0.856	0.86	0.47	Presisi Baik
S2	0.564	0.56	0.71	Presisi Baik
S3	0.463	0.454	1.96	Presisi Baik
S4	0.734	0.729	0.68	Presisi Baik
S5	10.753	10.744	0.08	Presisi Baik
S6	0.785	0.783	0.26	Presisi Baik
S7	1.035	1.036	0.10	Presisi Baik
S8	0.649	0.652	0.46	Presisi Baik

RIWAYAT HIDUP



Penulis bernama Bayu Prasetyo, lahir di Bogor, 3 Juni 2004 dan merupakan anak kedua dari dua bersaudara pasangan Bapak Trubus Santoso dan Ibu Tati Sulastri. Penulis memulai pendidikan dasar di SD Negeri 1 Cicadas, Kabupaten Bogor, Jawa Barat pada tahun 2010-2016. Setelah itu, penulis melanjutkan pendidikan di SMP Negeri 1 Gunung Putri, Kabupaten Bogor pada tahun 2016-2019, Kabupaten Bogor, Jawa Barat. Pada tahun 2019, penulis melanjutkan pendidikan di SMA Negeri 1 Gunung Putri dan menyelesaikan pendidikan menengah atas pada tahun 2022. Pada tahun yang sama, penulis melanjutkan studi pada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Selama menempuh pendidikan di perguruan tinggi, penulis mengikuti berbagai kegiatan akademik maupun kegiatan kampus lainnya sebagai bagian dari pengembangan pengalaman dan kemampuan selama masa perkuliahan. Selain itu, pada tahun 2026 penulis melaksanakan kegiatan Kerja Praktik di PT Tirta Investama, Klaten, Jawa Tengah dengan topik mengenai “Studi Sistem Produksi Air Minum Dalam Kemasan Di PT Tirta Investama Klaten” pada bulan Januari hingga Februari 2026, penulis melaksanakan penelitian tugas akhir di kawasan dataran rendah sekitar Rawa Pening, Kabupaten Semarang, Jawa Tengah dengan fokus penelitian mengenai kualitas air tanah berdasarkan konsentrasi logam berat Kadmium (Cd). Penelitian tersebut disusun dalam tugas akhir berjudul “Analisis Distribusi Spasial Logam Berat Kadmium (Cd) pada Air Tanah Menggunakan Metode Interpolasi Geospasial di Dataran Rendah Rawa Pening” sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Islam Indonesia.

