TA/TL/2026/2115

JURUSAN
TEKNIK LINGKUNGAN

TUGAS AKHIR

Pemetaan Sebaran Kandungan Nitrat (NO_3) pada Air Tanah di Sekitar Dataran Rendah Rawa Pening, Kabupaten Semarang

Dininur Aprilliani
22513125

Dosen Pembimbing I:
Dhandhun Wacano, S.Si., M.Sc., Ph.D.

Dosen Pembimbing II:
Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.

Program Studi Teknik Lingkungan Program Sarjana
Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan
Universitas Islam Indonesia
2026

DEPARTMENT
ENVIRONMENTAL ENGINEERING

BACHELOR THESIS

Mapping the Distribution of Nitrate (NO_3) Concentrations in Groundwater Around the Rawa Pening Lowlands, Semarang Regency

Dininur Aprilliani
22513125

Supervisor I:
Dhandhun Wacano, S.Si., M.Sc., Ph.D.

Supervisor II:
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

Pemetaan Sebaran Kandungan Nitrat (NO_3) pada Air Tanah di Sekitar Dataran Rendah Rawa Pening, Kabupaten Semarang

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.

Dininur Aprilliani

22513125

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

20/07/2026

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

UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
YOGYAKARTA

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, 13 Juli 2026

Yang membuat pernyataan,



Dinimar Aprilliani

22513125

PRAKATA

Assalamu'alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Puji dan syukur senantiasa penulis panjatkan ke hadirat Allah *subhanahu wa ta'ala* atas segala limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga Tugas Akhir yang berjudul "Pemetaan Sebaran Kandungan Nitrat (NO_3) pada Air Tanah di Sekitar Dataran Rendah Rawa Pening, Kabupaten Semarang" ini dapat diselesaikan dengan baik. Penyusunan laporan Tugas Akhir ini dimaksudkan untuk memenuhi salah satu syarat akademik dalam memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia. Dalam proses penyusunan hingga penyelesaian laporan ini, penulis banyak menerima bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang tulus kepada:

1. Allah *subhanahu wa ta'ala*, yang telah melimpahkan segala kemudahan, perlindungan kesehatan, serta kekuatan lahir dan batin kepada penulis selama seluruh rangkaian penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Kedua orang tua tercinta, Ayahanda Rasid Gunawan dan Ibunda Dumyati, serta seluruh keluarga besar, atas doa yang tiada henti, pengorbanan, kasih sayang, dan dukungan moral maupun material yang menjadi kekuatan terbesar penulis.
3. Bapak Dhandhun Wacano, S.Si., M.Sc., Ph.D., selaku Dosen Pembimbing I, dan Ibu Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu, memberikan bimbingan, arahan, saran, motivasi, serta ilmu yang sangat berharga selama proses penelitian hingga penyusunan laporan ini selesai.
4. Seluruh dosen dan staff Program Studi Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia atas ilmu, pengalaman, dan bantuan yang telah diberikan selama masa perkuliahan.

5. Rekan-rekan seperjuangan Teknik Lingkungan Angkatan 2022, khususnya teman-teman terdekat TL D, teman seperjuangan Rawa Pening yang telah saling membantu, berdiskusi, dan berjuang bersama, juga sahabat-sahabat terdekat yang senantiasa menemani dan mendengarkan keluh kesah selama masa perkuliahan dan penyelesaian Tugas Akhir ini
6. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu, yang telah memberikan bantuan dan dukungan baik langsung maupun tidak langsung dalam penyelesaian laporan ini.

Penulis menyadari bahwa laporan Tugas Akhir ini masih jauh dari kesempurnaan karena keterbatasan kemampuan dan pengetahuan yang dimiliki. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun dari para pembaca demi perbaikan di masa mendatang. Akhir kata, semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat, wawasan, serta kontribusi positif bagi perkembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang teknik lingkungan dan pengelolaan sumber daya air.

Yogyakarta, 13 Juli 2026

Dininur Aprilliani

Pemetaan Sebaran Kandungan Nitrat (NO_3) pada Air Tanah di Sekitar Dataran Rendah Rawa Pening, Kabupaten Semarang

Mahasiswa	: Dininur Aprilliani
NIM	: 22513125
Program Studi	: Teknik Lingkungan - Program Sarjana
Pembimbing I	: Dhandhun Wacano, S.Si., M.Sc., Ph.D.
Pembimbing II	: Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.

Abstrak

Rawa Pening merupakan danau prioritas nasional dengan berbagai aktivitas antropogenik yang berpotensi meningkatkan konsentrasi nitrat pada air tanah. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui konsentrasi nitrat air tanah, memetakan pola sebaran spasial nitrat, serta menganalisis hubungan antara konsentrasi nitrat dengan parameter insitu pendukung di sekitar dataran rendah Rawa Pening, Kabupaten Semarang.

Penelitian dilakukan dengan delapan titik sampel sumur air yang tersebar di dataran rendah Rawa Pening. Pengukuran parameter insitu yaitu *Total Dissolved Solid* (TDS), suhu, pH dan *Dissolved Oxygen* (DO) dilakukan menggunakan alat Horiba U-50 multiparameter, sedangkan analisis konsentrasi nitrat dilakukan dengan mengacu pada SNI 6989-79:2011. Pemetaan sebaran spasial dilakukan menggunakan metode interpolasi *Inverse Distance Weighted* (IDW) pada perangkat lunak ArcGIS, sementara hubungan antar parameter dianalisis menggunakan korelasi *Log Pearson*.

Hasil pengujian menunjukkan konsentrasi nitrat berkisar antara 0,483 mg/L hingga 8,285 mg/L, seluruh hasil memenuhi baku mutu Permenkes No. 2 Tahun 2023 sebesar 20 mg/L. Pola sebaran spasial menunjukkan gradasi konsentrasi dari tinggi di bagian barat menuju rendah di bagian timur yang berbatasan dengan danau. Analisis korelasi menunjukkan DO memiliki hubungan positif paling kuat dengan nitrat, diikuti pH yang menunjukkan hubungan negatif, sedangkan TDS dan suhu tidak menunjukkan hubungan yang signifikan.

Kata kunci: Air Tanah, interpolasi IDW, Nitrat, Pemetaan Spasial, Rawa Pening

Mapping the Distribution of Nitrate (NO_3) Concentrations in Groundwater Around the Rawa Pening Lowlands, Semarang Regency

Student	: Dininur Aprilliani
Student Number	: 22513125
Study Program	: Environmental Engineering – Bachelor Program
Supervisor I	: Dhandhun Wacano, S.Si., M.Sc., Ph.D.
Supervisor II	: Puji Lestari, S.Si., M.Sc., Ph.D.

Abstract

Rawa Pening is a nationally prioritized lake where various anthropogenic activities have the potential to increase nitrate concentrations in groundwater. This study aims to determine groundwater nitrate concentrations, map the spatial distribution patterns of nitrate, and analyze the correlation between nitrate concentrations and supporting in-situ parameters around the Rawa Pening lowlands in Semarang Regency.

The study was conducted at eight groundwater well sampling points distributed across the Rawa Pening lowlands. In-situ parameter measurements including Total Dissolved Solids (TDS), temperature, pH, and Dissolved Oxygen (DO) were taken using a Horiba U-50 multiparameter, while nitrate concentration analysis was performed in accordance with SNI 6989-79:2011. Spatial distribution mapping was performed using the Inverse Distance Weighted (IDW) interpolation method in ArcGIS software, while the correlation between parameters were analyzed using Pearson's log-correlation.

Test results showed nitrate concentrations ranging from 0.483 mg/L to 8.285 mg/L; all results met the quality standard of Ministry of Health Regulation No. 2 of 2023, which is 20 mg/L. The spatial distribution pattern showed a concentration gradient from high in the western part to low in the eastern part bordering the lake. Correlation analysis indicated that DO had the strongest positive relationship with nitrate, followed by pH, which showed a negative relationship, while TDS and temperature showed no significant correlation.

Key words: Groundwater, IDW interpolation, Nitrate, Spatial mapping, Rawa Pening

DAFTAR ISI

PRAKATA i
Abstrak iii
DAFTAR ISI v
DAFTAR TABEL vii
DAFTAR GAMBAR viii
DAFTAR LAMPIRAN ix
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Rumusan Masalah 2
1.3 Tujuan 3
1.4 Manfaat 3
1.5 Ruang Lingkup 3
1.6 Kerangka Berpikir 4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA 5
2.1 Air Tanah 5
2.1.1 Definisi Air Tanah Bebas (*Unconfined Aquifer*) 5
2.1.2 Karakteristik Hidrogeologi 5
2.2 Nitrat 6
2.2.1 Siklus Nitrogen 6
2.2.2 Mobilitas dan Sifat Kimia Nitrat 7
2.3 Sumber Pencemar Nitrat 7
2.3.1 Aktivitas Pertanian 7
2.3.2 Limbah Domestik 8
2.4 Sistem Informasi Geografis (SIG) 8
2.4.1 Pemetaan Kualitas Air Tanah menggunakan SIG 9
2.4.2 Metode Interpolasi Spasial *Inverse Distance Weighting* (IDW) 9
2.5 Penelitian Terdahulu 10
BAB III METODE PENELITIAN 12
3.1 Tempat dan Waktu 12

3.2 Data dan Sumber Data 14
3.3 Metode Pengambilan Data 14
3.4 Analisis Laboratorium 15
3.5 Analisis Data 15
3.5.1 Statistik Deskriptif 15
3.5.2 Analisis Korelasi *Log Pearson* 16
3.5.3 Pemetaan Sebaran Spasial dengan Metode *Inverse Distance Weighted* (IDW) 17
3.6 Diagram Alur Penelitian 18
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 19
4.1 Deskripsi Kondisi Wilayah 19
4.2 Analisis Parameter Nitrat 20
4.3 Analisis Hubungan Nitrat dengan Parameter Lain 28
4.3.1 Analisis Hubungan Parameter Nitrat dan *Total Dissolved Solid* (TDS) 28
4.3.2 Analisis Hubungan Parameter Nitrat dan Suhu 30
4.3.3 Analisis Hubungan Parameter Nitrat dan pH 34
4.3.4 Analisis Hubungan Parameter Nitrat dan *Dissolved Oxygen* (DO) 37
4.4 Analisis Pola Persebaran Parameter Nitrat 41
4.5 Rekomendasi Pengelolaan 58
4.5.1 Pengendalian Kontaminasi dari Sektor Pertanian 58
4.5.2 Pengenlolaan Limbah Domestik dan Sanitasi Lingkungan 59
4.5.3 Konservasi Zona Penyangga Litoral Rawa Pening 59
BAB V PENUTUP 61
5.1 Kesimpulan 61
5.2 Saran 62
DAFTAR PUSTAKA 64
LAMPIRAN 69
RIWAYAT HIDUP 77

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu 10
Tabel 3.1 Data Titik Pengambilan Sampel 13
Tabel 4.1 Hasil Pengujian Nitrat 22
Tabel 4.2 Hasil Pengujian TDS 28
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Suhu 31
Tabel 4.4 Hasil Pengujian pH 35
Tabel 4.5 Hasil Pengujian DO 38

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Kerangka Berpikir 4
Gambar 3.1 Lokasi Rawa Pening, Kabupaten Semarang 12
Gambar 3.2 *Flowchart* Pengujian Nitrat 15
Gambar 3.3 Diagram Alur Penelitian 18
Gambar 4.1 Rawa Pening 19
Gambar 4.2 Kondisi Sekitar Lokasi Studi 20
Gambar 4.3 Hasil Pengujian Nitrat 27
Gambar 4.4 Hasil Pengujian TDS 29
Gambar 4.5 Grafik Hubungan Nitrat dan TDS 29
Gambar 4.6 Grafik Hasil Pengujian Suhu 32
Gambar 4.7 Grafik Hubunngan Nitrat dan Suhu 32
Gambar 4.8 Grafik Hasil Pengujian pH 35
Gambar 4.9 Grafik Hubungan Nitrat dan pH 36
Gambar 4.10 Grafik Hasil Pengujian DO 39
Gambar 4.11 Grafik Hubungan Nitrat dan DO 39
Gambar 4.12 Peta Sebaran Konsentrasi Nitrat 42
Gambar 4.13 Peta Sebaran Konsentrasi TDS 45
Gambar 4.14 Peta Sebaran Konsentrasi Suhu 46
Gambar 4.15 Peta Sebaran Konsentrasi pH 47
Gambar 4.16 Peta Sebaran Konsentrasi DO 48
Gambar 4.17 Grafik *Predicted* (a) Nitrat, (b) Suhu, (c) pH, (d) TDS, (e) DO 50
Gambar 4.18 Grafik *Error* (a) Nitrat, (b) Suhu, (c) pH, (d) TDS, (e) DO 54

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Hasil Sampling..... 69
Lampiran 2. Kurva Kalibrasi Nitrit..... 70
Lampiran 3. Kurva Kalibrasi Nitrat..... 71
Lampiran 4. Dokumentasi Kegiatan Pengambilan Sampel 72
Lampiran 5. Dokumentasi Kegiatan Pengujian Laboratorium 75

BAB I
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Rawa Pening merupakan salah satu danau yang ditetapkan sebagai kawasan prioritas nasional sehingga pemanfaatannya perlu dilakukan secara optimal (Asih et al., 2012). Danau ini memiliki luas kurang lebih 2.670 hektar dan berada di empat wilayah kecamatan, yakni Ambarawa, Bawen, Tuntang, dan Banyubiru. Secara geomorfologi, Rawa Pening menempati cekungan terendah yang dikelilingi oleh lereng Gunung Merbabu, Gunung Telomoyo, dan Gunung Ungaran (Amalia et al., 2023). Keberadaan danau tersebut berperan penting dalam menjaga keseimbangan ekosistem serta mendukung aktivitas ekonomi masyarakat di sekitarnya. Selain itu, Rawa Pening juga menjadi sumber penghidupan bagi penduduk lokal melalui kegiatan seperti perikanan tangkap, irigasi pertanian, dan pemanfaatan air tanah untuk kebutuhan domestik sehari-hari (Wulandari, 2022).

Di sekitar dataran Rawa Pening terdapat berbagai aktivitas manusia termasuk pertanian, permukiman penduduk, dan industri kecil yang berpotensi memberikan tekanan terhadap kualitas air tanah. Aktivitas pertanian seperti penggunaan pupuk kimia dan organik, diketahui menjadi sumber utama masuknya nitrogen ke dalam akuifer melalui proses infiltrasi (Hutagalung et al., 2022). Selain itu, penelitian menunjukkan bahwa nitrogen dari aktivitas darat dapat berpindah melalui aliran balik air tanah dan interaksi permukaan-subpermukaan, sehingga berpotensi memengaruhi kualitas air danau secara langsung maupun tidak langsung (Pujiindiyati, 2018). Kombinasi aktivitas pertanian, domestik, dan industri di sekitar Rawa Pening membuka peluang meningkatnya beban kontaminan, khususnya nitrat, dalam air tanah yang kemudian dapat berkontribusi terhadap degradasi kualitas air danau.

Beberapa studi menunjukkan bahwa aktivitas pertanian intensif, penggunaan pupuk nitrogen, serta limbah domestik dapat menyebabkan peningkatan konsentrasi nitrat (NO_3) dalam air tanah, terutama pada akuifer dangkal yang berdekatan dengan lahan pertanian. Di wilayah pertanian intensif di Alberta, Kanada, terdeteksi distribusi nitrat pada air tanah yang signifikan sebagai akibat pupuk dan limbah

ternak (Plata et al., 2025). Penelitian lainnya menunjukkan bahwa di lahan perkebunan kelapa sawit, konsentrasi nitrat pada air tanah berkorelasi dengan jarak terhadap titik aplikasi pupuk, kedalaman sumur, dan kondisi sumur gali (Hutagalung et al., 2022). Parameter nitrat menjadi penting karena bersifat mudah larut, mudah bergerak dalam tanah dan air, sehingga rentan mengalami *leaching* ke akuifer. Nitrat yang tinggi dalam air tanah dapat memunculkan risiko kesehatan, terutama bila air tanah digunakan untuk konsumsi manusia atau domestik (Bouselsal et al., 2025). Berdasarkan hasil wawancara pada tanggal 14 Januari 2026 dengan Bapak Aksiana selaku salah satu warga di sekitaran Rawa Pening memberikan keterangan bahwa warga sekitar menggunakan air tanah untuk Mandi, Cuci, Kakus (MCK) sehari-hari. Pemantauan dan analisis parameter nitrat dalam air tanah di kawasan dataran rendah di sekitar Rawa Pening sangat relevan dan diperlukan.

Berdasarkan kondisi dan potensi tekanan tersebut, penelitian ini dirancang sebagai upaya preventif untuk memetakan dan menganalisis kualitas air tanah di dataran rendah sekitar Rawa Pening, dengan fokus pada parameter nitrat. Tujuannya untuk mengetahui konsentrasi, pola sebaran, dan hubungan antara parameter nitrat dengan parameter *Total Dissolved Solid* (TDS), suhu, pH dan *Dissolved Oxygen* (DO). Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar kebijakan pengelolaan air tanah dan konservasi lingkungan di kawasan tersebut, serta sebagai referensi bagi pemangku kepentingan untuk intervensi mitigasi bila diperlukan.

1.2 Rumusan Masalah

1) Berapa konsentrasi Nitrat air tanah di sekitar dataran Rawa Pening, Kabupaten Semarang?
2) Bagaimana pola sebaran konsentrasi Nitrat di sekitar dataran Rawa Pening, Kabupaten Semarang?
3) Bagaimana hubungan antara parameter *Total Dissolved Solid* (TDS), suhu, pH, *Dissolved Oxygen* (DO) dengan Nitrat di sekitar dataran Rawa Pening, Kabupaten Semarang?

1.3 Tujuan

1) Mengetahui konsentrasi Nitrat di sekitar dataran Rawa Pening, Kabupaten Semarang.
2) Mengetahui pola sebaran Nitrat di sekitar dataran Rawa Pening, Kabupaten Semarang.
3) Mengetahui hubungan antara parameter *Total Dissolved Solid* (TDS), suhu, pH, *Dissolved Oxygen* (DO) dengan Nitrat di sekitar dataran Rawa Pening, Kabupaten Semarang.

1.4 Manfaat

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Menambah referensi ilmiah mengenai kualitas air tanah di wilayah dataran rendah dan pengaruh aktivitas antropogenik terhadap peningkatan konsentrasi nitrat.
2. Menyediakan informasi dasar bagi pemerintah daerah dan pemangku kepentingan dalam upaya mitigasi pencemaran nitrogen di sekitar Rawa Pening.
3. Mendukung upaya pengelolaan dan pelestarian ekosistem Rawa Pening secara berkelanjutan melalui pemantauan kualitas air tanah.

1.5 Ruang Lingkup

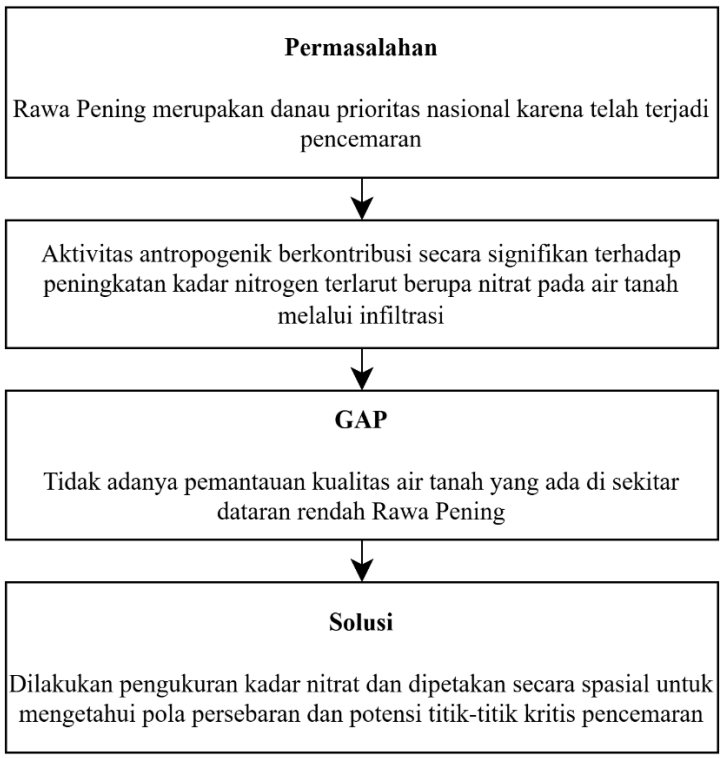
Ruang lingkup dalam penelitian ini yaitu:

1) Pengambilan sampel air tanah dilakukan di wilayah desa yang berada pada dataran rendah bagian barat Rawa Pening, Kabupaten Semarang, Jawa Tengah.
2) Parameter kimia air tanah yang dianalisis yaitu kandungan nitrat.
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 nitrat dilakukan dengan mengacu pada SNI 6989-79 2011.

5) Hasil analisis dibandingkan dengan Permenkes No. 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelakasanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan
6) Data pendukung dalam penelitian ini mencakup informasi penggunaan lahan, hasil observasi lapangan, serta wawancara.
7) Analisis spasial dilakukan menggunakan metode interpolasi *Inverse Distance Weighting* (IDW) menggunakan perangkat lunak *ArcGIS.*

1.6 Kerangka Berpikir

Penelitian ini dilakukan berdasarkan latar belakang yang kemudian dibuat kerangka berpikir sebagai berikut.



Gambar 1.1 Kerangka Berpikir

BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Air Tanah

2.1.1 Definisi Air Tanah Bebas (*Unconfined Aquifer*)

Air tanah didefinisikan sebagai seluruh air yang berada pada lapisan jenuh di bawah permukaan tanah (Todd & Mays, 2020). Berdasarkan kondisi pembatas hidroliknya, akuifer dibagi menjadi beberapa jenis, salah satunya adalah akuifer bebas. Akuifer bebas merupakan lapisan batuan atau sedimen permeabel yang lapisan atasnya tidak dibatasi oleh lapisan kedap air, sehingga muka air tanahnya berhubungan langsung dengan tekanan atmosfer (Fetter, 2018).

Air tanah adalah komponen hidrologi yang tersimpan dalam zona jenuh pada pori-pori tanah dan celah batuan pada akuifer, yang keberadaannya dipengaruhi oleh kondisi litologi, permeabilitas, topografi, serta masukan hidrologis seperti infiltrasi dan curah hujan. Studi terkini menekankan pentingnya karakterisasi hidrogeokimia dan pemantauan lapangan untuk memahami kelimpahan, dinamika, dan daya dukung air tanah sebagai sumber air baku di wilayah pesisir, karst, dan dataran rendah. Analisis kualitas dan kuantitas air tanah pada tingkat lokal hingga regional menjadi landasan manajemen sumber daya air yang berkelanjutan, terutama di daerah yang bergantung pada sumur dangkal dan sumber air artesis (Benam-Beltoungou et al., 2025).

2.1.2 Karakteristik Hidrogeologi

Dataran rendah yang berada di sekitar danau tektonik-vulkanik seperti Rawa Pening umumnya didominasi oleh material aluvial, endapan danau, dan rombakan material vulkanik yang bersifat tefra atau glasial (Bramana et al, 2019). Secara hidrogeologi, wilayah dataran rendah memiliki kelandaian topografi yang menyebabkan gradien hidrolik air tanah cenderung landai, sehingga laju aliran air tanah menjadi relatif lambat. Selain itu, posisi geomorfologis dataran rendah bertindak sebagai *discharge zone* sekaligus akumulasi air dari daerah *recharge zone* di perbukitan sekitarnya (Kusuma, 2021).

Kualitas air tanah ditentukan oleh parameter fisika, kimia, dan biologi yang menggambarkan kesesuaian air untuk konsumsi, irigasi, dan industri. Penelitian tahun 2025 menunjukkan bahwa perkembangan antropogenik serta kondisi geokimia lokal berperan besar pada variasi parameter kualitas seperti ion-ion nutrien, logam berat, dan paramater indikator mikrobiologis. Studi kasus di kawasan karst dan akuifer dangkal memperlihatkan bahwa interaksi antara sumber permukaan dan akuifer, serta perubahan hidrometeorologi, memengaruhi konsentrasi kontaminan dalam air tanah sehingga pemantauan berkelanjutan dan penilaian risiko kesehatan publik menjadi krusial (Aminuddin et al., 2025).

Kombinasi antara muka air tanah yang dangkal dan tingginya permeabilitas sedimen aluvial menciptakan tingkat kerentanan air tanah yang sangat tinggi. Zat pencemar yang terlarut di permukaan, baik dari aktivitas domestik maupun pertanian, hanya membutuhkan waktu retensi yang singkat untuk menembus zona tidak jenuh hingga mencapai *water table* (Vrba & Zaporozec, 2015). Maka dari itu, dataran rendah Rawa Pening secara alami memiliki benteng pertahanan hidrogeologi yang lemah terhadap infiltrasi polutan antropogenik.

2.2 Nitrat

Nitrat (NO_3) merupakan bentuk nitrogen yang sangat toksik di lingkungan tanah–air dan merupakan salah satu parameter kunci dalam penilaian kualitas air tanah, khususnya pada wilayah pertanian. Penambahan nitrogen pupuk meningkatkan konsentrasi bentuk nitrogen dalam tanah, yang secara potensial meningkatkan risiko nitrat mencuci ke air tanah apabila ada aliran air masuk (Mawaddah et al., 2016). Selain ancaman kesehatan nitrat juga berperan dalam perubahan ekosistem perairan akibat eutrofikasi ketika bermigrasi ke badan air permukaan. Studi pemodelan, analisis isotopik, dan pemetaan spasial nitrat menjadi fokus penting untuk mengidentifikasi sumber dan jalur migrasinya (Purwiyanto & Fauziyah, 2016).

2.2.1 Siklus Nitrogen

Nitrogen di dalam lingkungan mengalami transformasi biogeokimia yang kompleks melalui siklus nitrogen. Di dalam sistem tanah dan air tanah, senyawa nitrogen utamanya dikendalikan oleh tiga proses utama: nitrifikasi, denitrifikasi,

dan *leaching*. Proses nitrifikasi merupakan konversi biologis yang mengubah amonium (NH_4^+) menjadi nitrit (NO_2^-), yang kemudian dioksidasi lebih lanjut menjadi nitrat (NO_3^-) oleh bakteri autotrof seperti *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter* di bawah kondisi aerobik (Sprent, 2019). Proses ini berjalan sangat efektif pada zona tanah atas yang kaya akan oksigen terlarut.

$$2NO_4^+ + 3O_2 \rightarrow 2NO_2^- + 4H^+ + 2H_2O$$

$$2NO_2^- + O_2 \rightarrow 2NO_3^-$$

Sebaliknya, pada kondisi anaerobik, terjadi proses denitrifikasi. Denitrifikasi adalah reduksi nitrat menjadi gas nitrogen (N_2) atau nitrogen oksida (N_2O) oleh bakteri heterotrof (Appelo & Postma, 2015). Namun, apabila laju nitrifikasi di permukaan jauh melebihi kapasitas penyerapan oleh vegetasi dan laju denitrifikasi, maka kelebihan molekul NO_3^- akan mengalami *leaching*. *Leaching* adalah pergerakan zat terlarut ke bawah bersama aliran air perkolasi melewati profil tanah akibat gaya gravitasi hingga mencapai air tanah (Brady & Weil, 2017).

2.2.2 Mobilitas dan Sifat Kimia Nitrat

Nitrat (NO_3^-) adalah anion monovalen yang memiliki kelarutan yang sangat tinggi di dalam air dan bersifat sangat stabil pada lingkungan air tanah aerobik. Secara kimiawi, sebagian besar partikel koloid tanah bermuatan negatif, sehingga tidak memiliki kemampuan untuk mengadsorpsi anion nitrat melalui pertukaran ion (Hem, 2015). Akibat absennya proses retensi elektrostatik ini, nitrat bersifat sangat mobile dan bertindak sebagai *conservative tracer* di dalam air tanah. Nitrat akan bergerak searah dengan aliran air tanah tanpa mengalami pelemahan konsentrasi yang berarti oleh matriks batuan, kecuali jika menjumpai kondisi reduksi yang memicu denitrifikasi (Freeze & Cherry, 2019).

2.3 Sumber Pencemar Nitrat

2.3.1 Aktivitas Pertanian

Kawasan dataran rendah di sekitar Rawa Pening secara intensif dimanfaatkan untuk kegiatan pertanian lahan basah dan hortikultura. Guna mengoptimalkan hasil panen, penggunaan pupuk nitrogen sintetik seperti urea, dan NPK, serta pupuk organik dilakukan secara masif dan seringkali melebihi dosis yang dibutuhkan

tanaman (Sutrisno, 2022). Kelebihan pupuk nitrogen yang tidak terserap oleh perakaran tanaman akan mengalami transformasi menjadi nitrat melalui nitrifikasi.

Pencemaran yang bersumber dari lahan pertanian ini dikategorikan sebagai *non-point source pollution*. Karakteristik utama dari *non-point source pollution* adalah sebarannya yang luas, tidak memiliki titik pelepasan tunggal yang jelas, dan distribusinya dikendalikan oleh faktor hidrometeorologi serta tata guna lahan (Novotny, 2013). Air irigasi dan air hujan yang menggenangi lahan sawah bertindak sebagai media pembawa yang melarutkan nitrat dan membawanya meresap ke dalam akuifer bebas secara regional di seluruh luasan area budidaya tersebut.

2.3.2 Limbah Domestik

Pertumbuhan kawasan permukiman yang padat di sekitar dataran Rawa Pening memberikan kontribusi signifikan terhadap beban nitrat di air tanah. Limbah cair domestik, khususnya yang berasal dari ekskresi manusia, mengandung senyawa nitrogen organik dan amonia dalam konsentrasi tinggi (Metcalf & Eddy, 2014). Sebagian besar rumah tangga di wilayah pedesaan dan semi-perkotaan menggunakan sistem sanitasi setempat berupa *septic tank* konvensional yang strukturnya seringkali tidak kedap air.

Limbah yang merembes dari dinding atau dasar *septic tank* akan masuk ke dalam tanah. Di dalam zona tidak jenuh air yang masih memiliki suplai oksigen, amonia dari limbah domestik tersebut akan diubah oleh mikroorganisme menjadi nitrat melalui proses nitrifikasi (Canter, 2020). Mengingat jarak antar rumah yang padat dan posisi *septic tank* yang kerap berdekatan dengan sumur gali milik warga, rembesan ini menjadi sumber pencemaran nitrat antropogenik lokal yang kontinu dan mengancam keamanan air konsumsi masyarakat.

2.4 Sistem Informasi Geografis (SIG)

Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan alat analitik yang kuat untuk mengintegrasikan data kualitas air lapangan dengan data spasial penunjang seperti penggunaan lahan, topografi, dan jaringan drainase untuk menghasilkan peta sebaran, zonasi kerawanan, dan model prediktif. Integrasi kecerdasan buatan serta *machine learning* ke dalam model hidrologi untuk memperbaiki prediksi sumber daya air dan mendukung keputusan pengelolaan yang berkelanjutan (Marshall et al.,

2025). Integrasi SIG dengan data multi-temporal juga memungkinkan pemantauan perubahan kualitas air seiring waktu (Das, 2025).

2.4.1 Pemetaan Kualitas Air Tanah menggunakan SIG

Sistem Informasi Geografis (SIG) merupakan alat yang berbasis komputer untuk mengumpulkan, menyimpan, mengelola, menganalisis, dan menyajikan data yang memiliki referensi geografis atau spasial (Chang, 2019). Dalam studi teknik lingkungan, SIG digunakan secara luas untuk memantau dan mengevaluasi manajemen kualitas air tanah secara spasial. Pemetaan kualitas air tanah mentransformasikan data hasil uji laboratorium menjadi informasi visual berwujud peta sebaran kontonal atau zonasi (Burrough dkk., 2015). Melalui analisis spasial, area yang mengalami degradasi kualitas lingkungan atau memiliki risiko pencemaran tinggi dapat diidentifikasi dengan cepat, sehingga mempermudah proses pengambilan keputusan dalam pengelolaan sumber daya air.

2.4.2 Metode Interpolasi Spasial *Inverse Distance Weighting* (IDW)

Data kualitas air tanah umumnya diperoleh melalui metode sampling pada titik-titik sumur pantau atau sumur gali tertentu yang bersifat diskret. Untuk mengestimasi nilai konsentrasi nitrat pada wilayah yang tidak disampling, diperlukan metode analisis spasial yang disebut interpolasi. Salah satu metode interpolasi deterministik yang paling umum digunakan untuk pemetaan sebaran polutan adalah *Inverse Distance Weighting* (IDW).

Prinsip kerja IDW didasarkan pada Hukum Pertama Geografi Tobler, yang menyatakan bahwa segala sesuatu saling berhubungan, tetapi sesuatu yang dekat memiliki hubungan yang lebih erat daripada sesuatu yang jauh (Anselin, 2020). Dalam kalkulasinya, IDW berasumsi bahwa tingkat kemiripan antara titik sampel dengan titik yang diestimasi merupakan fungsi dari jarak. Bobot dari titik sampel akan berkurang secara proporsional seiring dengan bertambahnya jarak dari titik lokasi estimasi (Isaaks & Srivastava, 2019). Rumus matematis dasar dari interpolasi IDW dinyatakan sebagai berikut:

$$\hat{Z}(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^{n} w_i(x_0) \, . \, Z(x_i)}{\sum_{i=1}^{n} w_i(x_0)}$$

Di mana $\hat{Z}(x_0)$ adalah nilai estimasi pada lokasi $Z(x_i)$ adalah nilai hasil pengukuran pada lokasi i, dan $w_i(x_0)$ adalah bobot jarak yang ditentukan dengan rumus:

$$w_i(x_0) = \frac{1}{d(x_0, x_i)^p}$$

Di mana $d(x_0, x_i)$ merupakan jarak antara lokasi estimasi dengan lokasi sampel, sedangkan p adalah pangkat yang menentukan seberapa cepat bobot menurun seiring bertambahnya jarak. Metode IDW sangat cocok digunakan untuk memetakan polutan air tanah yang distribusinya sangat dipengaruhi oleh sumber pencemar lokal di sekitarnya.

2.5 Penelitian Terdahulu

Peneliti menggunakan beberapa acuan teori yang telah digunakan dalam penelitian sebelumnya yang relevan.

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Metode Utama	Temuan Utama	Relevansi dengan Penelitian Ini
1	Lukito et al., 2021	*Contaminated Groundwater by Nitrate in Sidoarum Village, Godean District, Sleman Regency*	Analisis kimia air tanah, pemetaan sebaran nitrat	Konsentrasi nitrat meningkat pada akuifer dangkal akibat aktivitas domestik dan pertanian; perubahan guna lahan memengaruhi sebaran nitrat.	Menunjukkan hubungan erat antara aktivitas penduduk/pertanian dan pencemaran nitrat pada akuifer dangkal, relevan untuk memahami risiko di kawasan Rawa Pening.
2	Vita Hidayati et al., 2025	*Spatio-Temporal Distribution of Nitrate and Phosphate in Serayu Watershed*	Analisis spasial & multivariat, sampling multi-stasiun	Variabilitas nitrat dipengaruhi musim, debit sungai, dan kondisi hulu–hilir; identifikasi area sumber nutrien.	Memberi gambaran dinamika nitrat pada skala DAS dan pentingnya pendekatan spasial, relevan bagi pemetaan kualitas air tanah sekitar Rawa Pening.

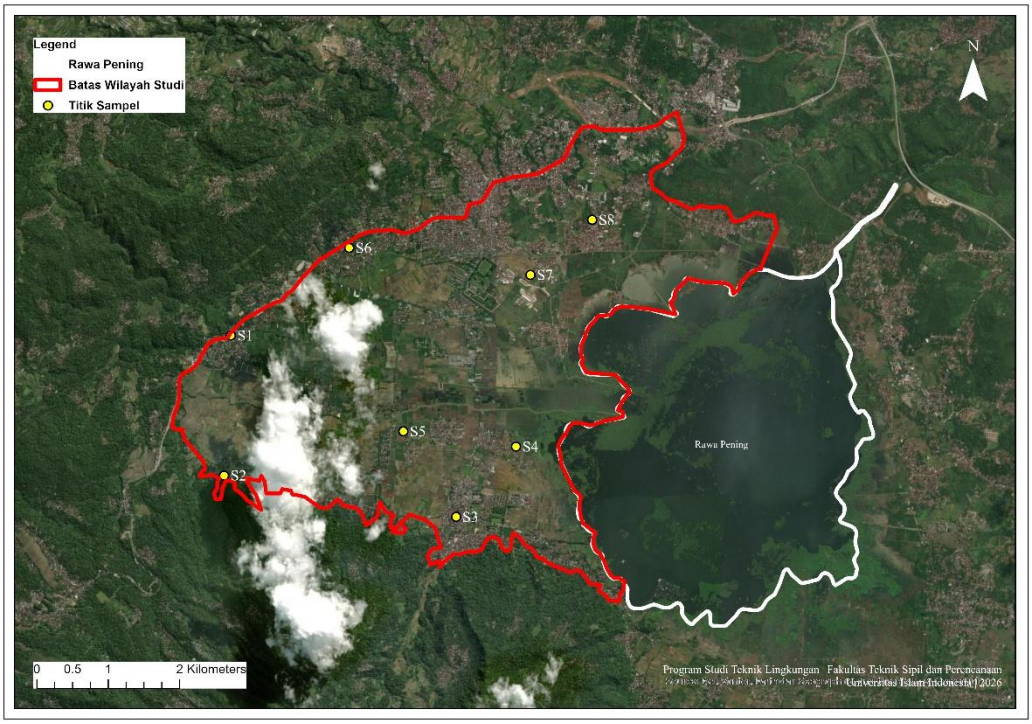
Lanjutan Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No	Peneliti & Tahun	Judul Penelitian	Metode Utama	Temuan Utama	Relevansi dengan Penelitian Ini
3	Falah & Sejati, 2023	*Distribusi Spasial Nitrat Air Tanah di Kecamatan Nanggulan, Kulon Progo*	Interpolasi GIS, analisis laboratorium	Konsentrasi nitrat lebih tinggi pada area dekat sawah irigasi; aktivitas pertanian menjadi sumber utama kontaminasi.	Menguatkan penggunaan metode SIG dalam pemetaan nitrat dan menjelaskan risiko akuifer pada wilayah pertanian mirip kondisi dataran rendah Rawa Pening.
4	Mamun, 2025	*Elemental Associations with Groundwater Nitrate in NE Saudi Arabia*	Analisis hidrogeokimia, GIS	Variasi nitrat dipengaruhi kondisi geologi, tekanan antropogenik, dan parameter hidrogeokimia lain; identifikasi hotspot kontaminasi.	Memberi acuan pendekatan komprehensif menggabungkan kimia air & SIG, relevan sebagai model analisis untuk nitrat/nitrit di Rawa Pening.

BAB III
METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu

Penelitian ini dilaksanakan selama periode Januari sampai Mei 2026. Pelaksanaan dimulai dengan pengumpulan data sekunder, pengambilan data primer, pengolahan data, hingga penyusunan laporan akhir.



Gambar 3.1 Lokasi Rawa Pening, Kabupaten Semarang
Sumber: *google.earth.com*

Kawasan dataran rendah sekitar Rawa Pening menjadi lokasi pengambilan sampel. Titik sampling meliputi sumur-sumur domestik, sumur bor, dan area pertanian di kawasan dataran rendah di sekitar danau bagian barat. Penentuan titik sampling dilakukan berdasarkan pada representasi penggunaan lahan, kedekatan dengan sumber kontaminan potensial yaitu wilayah yang dekat dengan pemukiman, pertanian, persebaran titik secara merata, dan aksesibilitas untuk pengambilan sampel dipilih delapan titik sampling. Penempatan delapan titik sampling dilakukan untuk memetakan pola sebaran konsentrasi Nitrat pada air tanah di sekitar dataran Rawa Pening.

Tabel 3.1 Data Titik Pengambilan Sampel

Kode Sampel	Waktu Pengambilan	Lokasi	Latitude	Longitude
S1	13.59 WIB	Pasar Jambu	-7.275095	110.373361
S2	14.31 WIB	Rumah Warga	-7.292561	110.372507
S3	10.35 WIB	Sekolah	-7.297729	110.401694
S4	09.46 WIB	Rumah Warga	-7.288953	110.409240
S5	11.26 WIB	Kantor Desa	-7.287053	110.395076
S6	13.39 WIB	Mushola	-7.264163	110.388241
S7	16.15 WIB	Mushola	-7.267536	110.411058
S8	12.42 WIB	Masjid	-7.260660	110.418822

Titik S1 dengan lokasi Pasar Jambu merepresentasikan dampak spasial dari aktivitas sosio-ekonomi pasar tradisional serta kawasan pemukiman sekitarnya, yang berpotensi menjadi sumber pencemar organik dan domestik terhadap akuifer dangkal. Titik S2 mengambil sumber air sumur rumah warga untuk mengevaluasi tingkat kontaminasi nitrat secara langsung yang bersumber dari sistem sanitasi setempat berupa rembesan *septic tank* warga. Titik S3 bersumber dari sumur sekolah yang berada ditengah-tengah pemukiman warga juga menilai pengaruh akumulasi aktivitas domestik dan sanitasi komunal air tanah setempat. Titik S4 merepresentasikan lokasi yang dekat dengan pemukiman warga dan juga sangat dekat dengan sawah dengan sumber sumur warga, di mana lokasi sumur berbatasan langsung dengan pemukiman padat sekaligus sawah. Titik S5 mengambil lokasi sumber air dari kantor desa yang lokasinya dikelilingi oleh sawah tanpa adanya pemukiman sama sekali didekatnya. Titik S6 berlokasi ditengah pemukiman warga dengan sumber sumur diambil dari sumur mushola terdekat. Titik S7 memiliki karakteristik yang serupa dengan titik S4 dengan sumber sumur dari masjid yang terletak pada perbatasan kritis antara pemukiman dan lahan pertanian aktif. Titik S8 berada di area domestik yang berbatasan langsung dengan kebun guna mengevaluasi potensi pencemaran dari kombinasi limbah rumah tangga dan aktivitas hortikultura lokal.

3.2 Data dan Sumber Data

Penelitian ini menggunakan dua jenis data utama data primer dan data sekunder.

3.2.1 Data Primer

Data primer diperoleh dari pengambilan sampel air tanah langsung di lapangan, yang kemudian dianalisis *Total Dissolved Solid* (TDS), suhu, pH, *Dissolved Oxygen,* dan Nitrat di laboratorium untuk parameter nitrat (NO_3). Data ini mencakup lokasi geografis, kedalaman sumur, jenis penggunaan lahan di sekitar titik sampling, serta kondisi fisik air saat pengambilan.

3.2.2 Data Sekunder

Data sekunder diperoleh dari dokumen resmi dan publikasi sebelumnya, meliputi peta topografi, peta penggunaan lahan, data hidrologi Rawa Pening, serta standar kualitas air tanah nasional. Data sekunder ini digunakan untuk mendukung analisis spasial dan interpretasi hasil laboratorium.

3.3 Metode Pengambilan Data

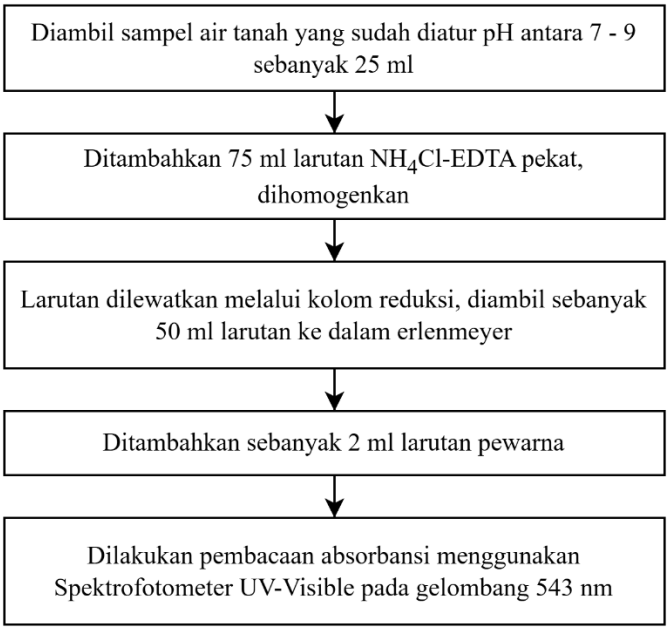
Penentuan titik sampling dalam penelitian ini dilakukan berdasarkan pertimbangan batas wilayah yang telah ditentukan, lokasi yang berada di dataran rendah bagian barat Rawa Pening, jenis sumur gali atau sumur bor, titik yang tersebar merata di dalam batas wilayah studi, ketersediaan pemilik sumur dalam memberikan izin pengambilan sampel. Berdasarkan kriteria tersebut, ditetapkan delapan titik sampling yang tersebar di wilayah sekitar dataran rendah Rawa Pening. Koordinat setiap titik sampling direkam menggunakan GPS (*Global Positioning System*) pada saat pengambilan sampel untuk keperluan pemetaan spasial.

Pengambilan sampel air tanah dilakukan sebanyak satu kali pada setiap titik sampling. Pengukuran parameter insitu TDS, suhu, pH, DO dilakukan secara langsung pada saat pengambilan sampel menggunakan Horiba U-50 multiparameter, sementara sampel air untuk analisis nitrat dan nitrit di laboratorium diambil dan diawetkan dengan menambahkan larutan H_2SO_4 hingga pH air sampel < 2 mencegah perubahan biologis yang dapat mengubah konsentrasi nitrat dan nitrit selama transportasi dan penyimpanan. Seluruh botol sampel yang telah diawetkan kemudian disimpan dalam *cool box* berisi es batu pada suhu ± 4°C untuk memperlambat aktivitas biologis dan kimiawi yang dapat memengaruhi integritas

sampel. Sampel harus segera dikirim ke laboratorium dan dianalisis dalam waktu maksimal 48 jam setelah pengambilan sesuai dengan batas waktu maksimum penyimpanan yang disyaratkan dalam SNI 6989.58:2008 untuk parameter nitrat.

3.4 Analisis Laboratorium

Analisis laboratorium untuk pengujian Nitrat dilakukan di Laboratorium Kualitas Air Jurusan Teknik Lingkungan menggunakan metode kolom reduksi dengan mengacu SNI 6989-79 2011.



Gambar 3.2 *Flowchart* Pengujian Nitrat

Kemudian, hasil uji laboratorium dibandingkan dengan baku mutu yang mengacu pada PERMENKES No 2 Tahun 2023. Nilai konsentrasi yang didapat digunakan juga untuk dilakukan pemodelan pola persebaran konsentrasi nitrat di sekitar dataran rendah Rawa Pening.

3.5 Analisis Data

3.5.1 Statistik Deskriptif

Dalam meringkas dan menggambarkan karakteristik data konsentrasi nitrat serta parameter TDS, suhu, pH, DO secara kuantitatif dari seluruh titik sampling. Statistik deskriptif yang dihitung meliputi nilai minimum, nilai maksimum, dan nilai rata-rata dari masing-masing parameter. Nilai minimum dan maksimum

digunakan untuk mengetahui rentang sebaran data, sementara nilai rata-rata digunakan sebagai representasi nilai tengah yang mewakili keseluruhan dataset. Seluruh perhitungan statistik deskriptif dilakukan menggunakan Microsoft Excel dengan hasil yang disajikan dalam bentuk tabel ringkasan untuk memudahkan interpretasi dan perbandingan antar parameter.

3.5.2 Analisis Korelasi *Log Pearson*

Analisis korelasi digunakan untuk mengetahui dan mengkuantifikasi kekuatan serta arah hubungan antara konsentrasi nitrat dengan masing-masing parameter kualitas air tanah yang diuji, yaitu TDS, suhu, pH, dan DO. Metode yang digunakan adalah korelasi *Log Pearson* dengan transformasi logaritmik terhadap data yang tidak berdistribusi normal, guna memenuhi asumsi linieritas yang dipersyaratkan dalam analisis korelasi parametrik. Transformasi logaritmik dilakukan dengan mengubah nilai asli setiap variabel menjadi nilai logaritma naturalnya (ln) atau logaritma basis 10 ($\log_{10}$) sebelum dilakukan perhitungan koefisien korelasi, sehingga distribusi data yang awalnya miring dapat dinormalkan dan hubungan antar variabel yang bersifat non-linear dapat dilinearkan. Koefisian korelasi pearson (r) dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$r = \frac{n\sum X_i Y_i - \sum X_i \sum Y_i}{\sqrt{\left[n\sum {X_i}^2 - (\sum X_i)^2\right]\left[n\sum {Y_i}^2 - (\sum Y_i)^2\right]}}$$

Dimana:

r = koefisien korelasi pearson

n = jumlah data

X_i = nilai log dari variabel bebas

Y_i = nilai log dari variabel terikat

Visualisasi hubungan antar variabel disajikan dalam bentuk *scatter plot* dengan garis regresi linear untuk memudahkan interpretasi arah dan pola hubungan secara grafis.

3.5.3 Pemetaan Sebaran Spasial dengan Metode *Inverse Distance Weighted* (IDW)

Pemetaan sebaran spasial konsentrasi nitrat dan parameter kualitas air tanah lainnya dilakukan menggunakan metode interpolasi *Inverse Distance Weighted* (IDW) pada perangkat lunak ArcGIS. IDW merupakan salah satu metode interpolasi deterministik yang paling umum digunakan dalam pemetaan kualitas air tanah karena kemudahannya dalam penerapan serta kemampuannya menghasilkan permukaan spasial yang halus berdasarkan titik-titik data yang tersebar tidak merata. Prinsip dasar metode IDW adalah bahwa nilai suatu lokasi yang tidak diketahui diprediksi berdasarkan nilai pada titik-titik sampel di sekitarnya, dengan asumsi bahwa titik yang lebih dekat memiliki pengaruh yang lebih besar dibandingkan titik yang lebih jauh. Bobot setiap titik sampel terhadap lokasi prediksi berbanding terbalik dengan pangkat dari jarak antara titik sampel tersebut dengan lokasi yang diprediksi, sesuai dengan persamaan berikut:

$$Z(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{Z(x_i)}{d_i^p}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_i^p}}$$

Dimana:

$Z(x_0)$ = nilai prediksi pada lokasi yang tidak diketahui

$Z(x_i)$ = nilai terukur pada titik sampel ke-i

d_i = jarak antara titik sampel ke-i dengan lokasi prediksi

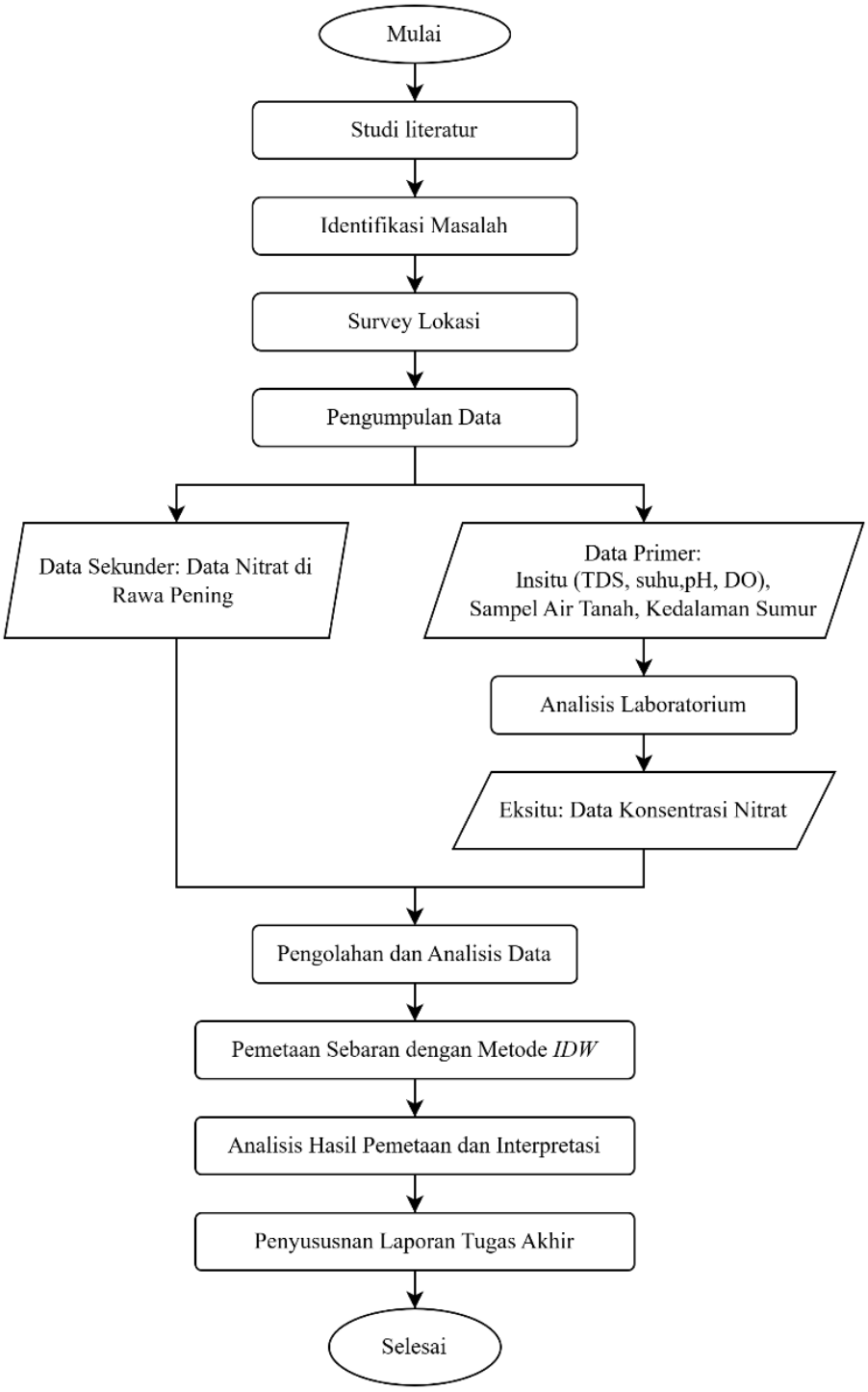
p = parameter yang menentukan tingkat pengaruh jarak

n = jumlah titik sampel yang digunakan

Nilai parameter pangkat yang digunakan dalam penelitian ini adalah p = 2, yang merupakan nilai default yang paling umum digunakan dan menghasilkan permukaan interpolasi yang halus dengan penurunan pengaruh yang cepat seiring bertambahnya jarak. Semakin besar nilai p, semakin kuat pengaruh titik-titik yang dekat dan semakin lemah pengaruh titik-titik yang jauh terhadap nilai prediksi, sehingga permukaan yang dihasilkan akan semakin lokal.

3.6 Diagram Alur Penelitian

Diagram alur penelitian yang menggambarkan tahapan-tahapan utama dalam proses pengumpulan data, analisis, hingga penarikan kesimpulan.



Gambar 3.3 Diagram Alur Penelitian

BAB IV
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Deskripsi Kondisi Wilayah

Kondisi geografis kota ini berada di dataran rendah yang secara administratif dikelilingi empat kecamatan yaitu Ambarawa, Bawen, Tuntang, dan Banyubiru. Kondisi topografi wilayah ini dari barat dengan ketinggian tanah berada 482 meter diatas permukaan laut, sedangkan bagian timur yang mengarah ke Rawa Pening memiliki ketinggian yang lebih rendah yaitu 464 meter diatas permukaan laut yang menandakan bahwa arah aliran air berasal dari dataran yang lebih tinggi menuju ke dataran yang lebih rendah. Luas wilayah yang menjadi lokasi studi yaitu 2125,93 m^2.



Gambar 4.1 Rawa Pening

Wilayah studi yang berada di dataran rendah bagian barat Rawa Pening mencakup delapan titik pengambilan sampel air tanah yang tersebar dengan karakteristik penggunaan lahan yang beragam. Titik S1 dan titik S2 berada di bagian barat dan barat daya wilayah studi, keduanya terletak di titik dengan dominasi tutupan vegetasi rapat berupa kebun campuran dan tegalan, permukiman yang cukup sedikit, serta aksesibilitas yang terbatas. Titik S3 yang berada ditengah-tengah pemukiman warga juga menilai pengaruh akumulasi aktivitas domestik dan sanitasi komunal air tanah setempat, dengan mata pencaharian penduduk sekitar yang sebagian besar sebagai petani. Titik S4 berada di zona yang lebih dekat ke tepi

barat danau dengan dikelilingi sawah dan lahan basah yang dominan, berpotensi mendapat masukan nitrat yang tinggi dari aktivitas pertanian intensif yang bergantung pada irigasi danau. Titik S5 terletak di bagian tengah wilayah studi pada zona transisi antara lahan pertanian dan permukiman yang cukup sedikit. Titik S6 berada di bagian barat-tengah yang memperlihatkan kepadatan permukiman lebih tinggi dengan pola bangunan lebih terstruktur dan jaringan jalan yang lebih padat, mencerminkan kawasan semi-perkotaan yang sebelumnya merupakan lahan pertanian produktif dan kini telah banyak mengalami alih fungsi menjadi perumahan seiring berkembangnya Kota Ambarawa. Titik S7 terletak di bagian tengah-timur pada zona permukiman yang cukup padat. Titik S8, yang merupakan titik paling timur laut dan paling dekat dengan badan danau di sisi utara dekat dengan alun-alun Ambarawa, didominasi oleh pemukiman.



Gambar 4.2 Kondisi Sekitar Lokasi Studi

Potensi pencemaran di wilayah ini dapat disebabkan oleh aktivitas pertanian dan limbah domestik dari aktivitas masyarakat. Berdasarkan hasil observasi kondisi lingkungan pada setiap titik menunjukkan adanya aktivitas pembuangan air limbah rumah tangga, penggunaan *septic tank,* pertanian yang relatif dekat dengan titik sampling.

4.2 Analisis Parameter Nitrat

Pengukuran konsentrasi nitrat tersebar pada delapan titik di sekitar dataran rendah Rawa Pening. Pengambilan delapan titik sampel dilakukan untuk memprediksi pola sebaran konsentrasi di sekitar dataran rendah Rawa Pening.

Pengujian nitrit dilakukan pertama, didapatkan hasil pada sampel satu sebagaimana yang didapat pada Lampiran 2 yaitu 0.00332 mg/L yang berada di bawah nilai *Limit of Detection* (LOD) metode yaitu sebesar 0,01305 mg/L. Oleh karena itu, konsentrasi nitrit pada sampel dinyatakan tidak terdeteksi. Kondisi ini mengindikasikan bahwa nitrit tidak berakumulasi secara signifikan di dalam air tanah wilayah studi, yang dapat disebabkan oleh berlangsungnya proses nitrifikasi yang relatif sempurna sehingga nitrit sebagai produk antara segera teroksidasi menjadi nitrat, atau oleh proses denitrifikasi yang berlangsung pada zona anoksik sehingga nitrit tidak terakumulasi. Temuan ini konsisten dengan terdeteksinya nitrat pada seluruh titik sampling sebagai bentuk nitrogen anorganik yang dominan di air tanah wilayah studi.

Pada kondisi aerobik, nitrit yang terbentuk dari oksidasi amonia oleh bakteri *Nitrosomonas* segera dioksidasi lebih lanjut menjadi nitrat oleh bakteri *Nitrobacter* sehingga tidak sempat berakumulasi. Sebaliknya, pada kondisi anoksik, nitrit yang terbentuk dalam proses denitrifikasi langsung direduksi menjadi gas nitrogen (N_2) yang terlepas ke atmosfer. Dengan demikian, nitrogen anorganik yang dominan dan stabil di air tanah wilayah studi adalah nitrat (NO_3), sehingga analisis kualitas air tanah terkait pencemaran nitrogen difokuskan sepenuhnya pada parameter nitrat sebagai representasi akhir dari transformasi nitrogen di lingkungan air tanah. Dalam melakukan pengujian nitrat itu dilakukan secara duplo untuk memastikan akurasi dan konsistensi hasil pengujian tinggi. Data yang ditampilkan dalam tabel 4.1 merupakan hasil perhitungan dengan menggunakan kurva kalibrasi yang terlampir pada Lampiran 3 yang dihasilkan rerata konsentrasi pengujian duplo yang dapat dilihat pada Lampiran 1. Baku mutu yang menjadi acuan dalam penelitian ini yaitu PERMENKES No 2 Tahun 2023 dengan baku mutu 20 mg/L.

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Nitrat

Kode Sampel	Lokasi Titik	Kedalaman Sumur (m)	Nitrat (NO_3) (mg/L)	Baku Mutu (mg/L)
S1	Pasar Jambu	15	8,285	20
S2	Rumah Warga	20	3,029	
S3	Sekolah	12	7,469	
S4	Rumah Warga	38	0,483	
S5	Kantor Desa	20	0,608	
S6	Mushola	20	3,318	
S7	Mushola	40	0,662	
S8	Masjid	30	2,246	
Nilai Maximum		**40**	**8,285**	
Nilai Minimum		**12**	**0,483**	
Rerata		**24**	**3,263**	

S1 yang berlokasi di Pasar Jambu mencatat konsentrasi nitrat tertinggi dari seluruh titik sampling sebesar 8,285 mg/L, dan kondisi ini dapat dijelaskan melalui interaksi beberapa faktor yang bekerja secara bersamaan. Kedalaman sumur yang hanya 15 meter menjadikan S1 sebagai sumur terdangkal kedua di antara seluruh titik, sehingga jarak vertikal antara permukaan tanah dan zona jenuh air sangat pendek, yang berarti proses filtrasi alami tanah dalam melemahkan kontaminan menjadi sangat terbatas. Kawasan pasar yang menjadi lokasi titik sampling merupakan area dengan aktivitas ekonomi tinggi yang menghasilkan akumulasi limbah organik dari sisa bahan makanan, sampah basah, dan air limbah perdagangan yang kaya nitrogen organik, di mana dekomposisi bahan organik tersebut oleh mikroorganisme di lapisan tanah akan menghasilkan amonia yang selanjutnya ternitrifikasi menjadi nitrat. Kondisi ini didukung oleh nilai DO pada Tabel 4.5 yang tinggi yaitu 5,56 mg/L yang mengkonfirmasi kondisi aerobik akuifer sehingga proses nitrifikasi berlangsung sempurna sekaligus menghambat degradasi nitrat melalui denitrifikasi, serta nilai pH pada Tabel 4.4 terendah yaitu 6,91 yang semakin menghambat aktivitas bakteri denitrifikasi. Berdasarkan hasil observasi, S1 berada di bagian barat wilayah studi dengan kondisi lingkungan ada kebun campuran di mana aerasi tanah yang baik pada lahan kering mendukung nitrifikasi yang lebih efisien, dengan pupuk nitrogen dari pertanian sekitar yang dengan mudah teroksidasi menjadi nitrat dan terinfiltrasi menuju akuifer dangkal.

Kombinasi antara kedalaman sumur yang sangat dangkal, intensitas masukan nitrogen dari aktivitas pasar dan pertanian lahan kering, kondisi akuifer aerobik, serta pH rendah yang menghambat denitrifikasi menjadikan S1 sebagai titik dengan akumulasi nitrat tertinggi di wilayah studi.

S2 yang dilakukan sampling dari sumur di rumah warga dengan kedalaman sumur 20 meter didapat konsentrasi nitrat sebesar 3,029 mg/L. Titik ini berada di bagian barat daya wilayah studi pada kaki perbukitan dengan vegetasi di sekitarnya cukup rapat dan ada juga permukiman, sehingga potensi pencemaran dari aktivitas antropogenik terhadap kualitas air tanah di titik ini relatif lebih rendah dibandingkan titik S1. Konsentrasi nitrat yang didapatkan ini kemungkinan besar berasal dari dekomposisi bahan organik alami dari vegetasi di sekitar lokasi, ditambah kontribusi dari limbah domestik rumah tangga melalui rembesan septik tank yang ada. Kedalaman sumur 20 meter yang lebih dalam dibandingkan S1 memberikan lapisan penyangga tanah yang lebih tebal sehingga sebagian nitrat dari permukaan dapat terdenitrifikasi sebelum mencapai akuifer, sementara nilai DO 2,08 mg/L menunjukkan kondisi yang memungkinkan sedikit denitrifikasi berlangsung sehingga nitrat yang masuk sebagian terdegradasi dan konsentrasinya hanya berada di tingkat menengah.

S3 yang berlokasi di sekolah dengan kedalaman sumur 12 meter yang merupakan titik sampling dengan kedalaman sumur terdangkal mencatat konsentrasi nitrat tertinggi kedua sebesar 7,469 mg/L. Namun, ditemukan hal yang menarik untuk dikaji adalah tingginya konsentrasi nitrat tersebut terjadi pada kondisi DO pada Tabel 4.5 yang sangat rendah yaitu 0,60 mg/L. Hal ini sejalan dengan studi yang menunjukkan bahwa pada sistem akuifer dangkal, tingginya laju infiltrasi nitrat baru dari zona vadose sering kali melampaui kapasitas laju denitrifikasi alami akuifer, sehingga akumulasi nitrat tetap tinggi meskipun pasokan oksigen telah menipis (Green et al. 2008). S3 berada di wilayah studi pada zona perpaduan sawah irigasi dan permukiman yang mulai berkembang, dimana dua sumber masukan nitrogen masuk dari pertanian sawah yang menggunakan pupuk nitrogen dalam jumlah besar menghasilkan nitrat yang mudah tercuci oleh air irigasi melalui proses *leaching* ke lapisan tanah di bawahnya, sementara permukiman pedesaan di sekitarnya berkontribusi melalui rembesan limbah domestik dari *septic*

tank yang tidak sepenuhnya kedap. Tingginya konsentrasi nitrat meskipun kondisi DO rendah mengindikasikan bahwa laju masukan nitrat dari permukaan melebihi kapasitas degradasi alami di dalam akuifer, di mana nitrat yang terdeteksi kemungkinan besar merupakan nitrat yang baru saja terinfiltrasi dari zona yang masih aerobik sebelum kondisi anoksik di dalam akuifer sempat mendegradasinya, dan kondisi ini diperparah oleh kedalaman sumur yang hanya 12 meter sehingga jalur perjalanan kontaminan dari permukaan ke akuifer relatif pendek.

S4 yang juga titik sampling bersumber dari sumur di rumah warga dengan kedalaman sumur 38 meter mencatat konsentrasi nitrat terendah dari seluruh titik sampling sebesar 0,483 mg/L. Kedalaman sumur 38 meter yang merupakan kedalaman terdalam kedua di antara seluruh titik memberikan jarak vertikal yang jauh lebih panjang antara sumber nitrat di permukaan dengan zona jenuh air, sehingga selama perjalanan infiltrasi melalui lapisan tanah yang tebal, nitrat memiliki waktu tinggal yang lebih lama dan proses denitrifikasi dapat berlangsung lebih efektif. Berdasarkan hasil observasi, S4 berada di wilayah yang relatif dekat dengan tepi barat danau pada zona yang didominasi sawah dan lahan basah, di mana sistem sawah dengan genangan air menciptakan kondisi anoksik di lapisan tanah bawah yang secara aktif mendenitrifikasi nitrat sebelum mencapai akuifer. Lokasi sumur yang merupakan rumah warga tanpa aktivitas komersial di sekitarnya menjadikan tekanan masukan nitrogen jauh lebih minim dibanding S1, dan kondisi DO pada Tabel 4.5 dengan nilai 1,54 mg/L yang konsisten dengan lingkungan lahan basah di sekitarnya semakin menekan akumulasi nitrat melalui denitrifikasi, sehingga seluruh faktor protektif ini bekerja secara sinergis menghasilkan konsentrasi nitrat yang paling rendah di wilayah studi.

Titik sampling selanjutnya S5 sampel air tanah diambil di kantor desa dengan kedalaman sumur 20 meter mencatat konsentrasi nitrat sebesar 0,608 mg/L. Titik S5 berada di bagian tengah wilayah studi pada zona didominasi lahan pertanian, namun meskipun berada ditengah sumber potensial nitrat tersebut, konsentrasinya justru rendah. Hal ini dapat dikaitkan dengan posisi S5 yang berada di zona dataran rendah di mana muka air tanah relatif lebih dekat ke permukaan dan kondisi akuifer cenderung subanoksik dengan nilai DO pada Tabel 4.5 yaitu 2,06 mg/L, sehingga nitrat yang masuk dari kedua sumber tersebut sebagian besar terdenitrifikasi

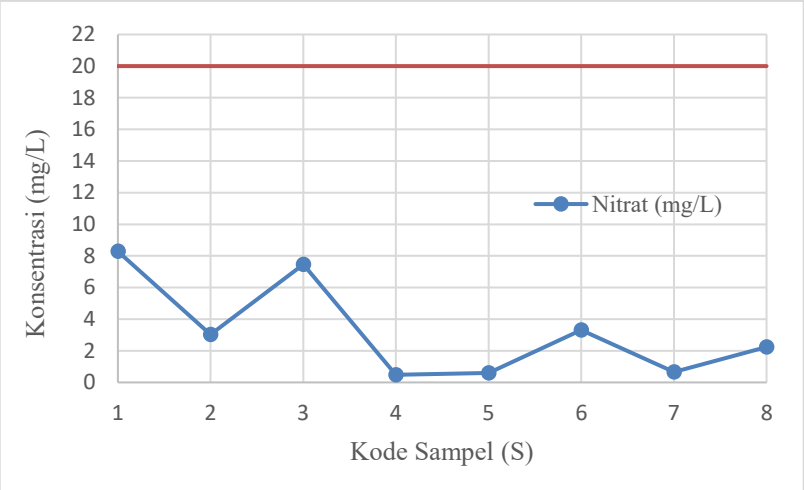
sebelum terakumulasi dalam konsentrasi yang signifikan. Selain itu, kawasan kantor desa yang merupakan fasilitas pemerintahan dengan lahan terbangun dan halaman yang tidak secara intensif berkontribusi menyumbang nitrogen menjadikan masukan nitrogen di sekitar titik ini tidak setinggi kawasan pertanian aktif maupun permukiman padat dengan kepadatan *septic tank* yang tinggi, sehingga kombinasi antara masukan yang rendah dan kemampuan denitrifikasi akuifer yang moderat menghasilkan konsentrasi nitrat yang rendah.

S6 yang titik pengambilan sampling dilakukan di mushola dengan kedalaman sumur 20 meter mencatat konsentrasi nitrat sebesar 3,318 mg/L. Titik S6 berada di bagian yang memperlihatkan kepadatan pemukiman cukup tinggi mencerminkan kawasan semi-perkotaan di pinggiran Kota Ambarawa yang mengalami tekanan pemukiman cukup intensif. Konsentrasi nitrat yang sedang di titik ini mencerminkan dominasi sumber limbah domestik dari permukiman padat di sekitarnya, di mana rembesan dari *septic tank* dan saluran pembuangan air limbah rumah tangga yang tidak sepenuhnya kedap menjadi jalur utama masukan nitrogen ke air tanah. Meskipun tekanan permukiman cukup tinggi, konsentrasi nitrat tidak mencapai tingkat tertinggi, kemungkinan karena lahan terbangun yang mendominasi justru mengurangi laju infiltrasi air ke dalam tanah dibandingkan lahan pertanian terbuka akibat tutupan permukaan yang lebih impermeabel, sementara nilai DO yang tertera pada Tabel 4.5 yang cukup tinggi yaitu 4,77 mg/L menunjukkan akuifer masih dalam kondisi aerobik yang menstabilkan nitrat namun kedalaman sumur 20 meter memberikan cukup lapisan penyangga untuk meretensi sebagian nitrat sebelum mencapai akuifer.

Titik S7 dengan lokasi pengambilan sampel di mushola dengan kedalaman sumur 40 meter kedalaman terdalam di antara seluruh titik sampling mencatat konsentrasi nitrat yang sangat rendah sebesar 0,662 mg/L, dan temuan ini menjadi salah satu yang paling menarik karena lokasinya berada di sekitar permukiman yang cukup padat yang seharusnya menjadi sumber masukan limbah domestik yang signifikan. Penjelasan utama atas rendahnya nitrat di S7 terletak pada dua faktor yang bekerja secara sinergis yaitu pertama, kedalaman sumur 40 meter yang merupakan terdalam dari seluruh titik memberikan lapisan tanah paling tebal sebagai pelindung alami sehingga nitrat dari permukaan memiliki waktu perjalanan

paling panjang dan kesempatan paling besar untuk terdenitrifikasi sebelum mencapai akuifer; kedua, nilai DO seperti pada Tabel 4.5 yang paling rendah dari seluruh titik sampling yaitu 0,05 mg/L mengindikasikan kondisi anoksik penuh di dalam akuifer, di mana bakteri denitrifikasi bekerja sangat aktif menggunakan nitrat sebagai akseptor elektron pengganti oksigen sehingga hampir seluruh nitrat yang masuk ke akuifer langsung terdenitrifikasi menjadi gas nitrogen yang terlepas ke atmosfer sebelum sempat terakumulasi. Pengaruh kedekatan dengan danau yang menciptakan kondisi jenuh air dan anoksik di sekitar zona litoral menjadi faktor dominan yang mengendalikan rendahnya nitrat di titik ini, sehingga meskipun terdapat permukiman di sekitarnya, kondisi hidrogeologi yang sangat reduktif secara efektif menetralisir masukan nitrogen tersebut.

S8 yang berlokasi di masjid dengan kedalaman sumur 25 meter mencatat konsentrasi nitrat sebesar 2,246 mg/L. S8 merupakan titik yang paling dekat dengan badan danau di sisi utara-timur wilayah studi, dengan lingkungan sekitar yang lebih terbuka dan permukiman yang relatif jarang, didominasi oleh zona penyangga danau dan lahan yang lebih terbuka. Nilai DO pada Tabel 4.5 menunjukkan nilai 0,13 mg/L mengindikasikan akuifer hampir sepenuhnya anoksik akibat pengaruh langsung kedekatan dengan lingkungan lahan basah danau, kondisi ini secara aktif mendenitrifikasi sebagian besar nitrat yang masuk sehingga konsentrasinya tetap rendah meskipun nilai TDS seperti pada Tabel 4.2 di titik ini merupakan yang tertinggi dengan 0,252 mg/L yang mengindikasikan adanya interaksi antara air tanah dengan air danau yang membawa ion-ion mineral terlarut lain. Kedalaman sumur 25 meter yang berada di atas rata-rata memberikan lapisan penyangga tanah yang cukup untuk meretensi sebagian nitrat, namun faktor paling dominan yang menjaga konsentrasi nitrat tetap rendah adalah kondisi anoksik akuifer yang dipengaruhi oleh kedekatan dengan ekosistem lahan basah danau Rawa Pening, menjadikan S8 sebagai representasi titik di mana pengaruh lingkungan danau secara hidrogeologis lebih dominan daripada tekanan dari aktivitas manusia di sekitarnya.



Gambar 4.3 Hasil Pengujian Nitrat

Berdasarkan hasil pengujian nitrat pada delapan titik sampling yang disajikan dalam tabel, seluruh nilai konsentrasi nitrat yang terukur masih berada di bawah ambang batas maksimum yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan. Regulasi tersebut menetapkan kadar maksimum nitrat yang diperbolehkan dalam air minum sebesar 20 mg/L. Nilai konsentrasi nitrat pada kedelapan titik sampling berkisar antara 0,483 mg/L pada S4 hingga 8,285 mg/L pada S1, yang berarti seluruh titik masih memenuhi persyaratan kualitas air minum. Secara regulasi, kondisi ini menunjukkan bahwa air tanah di wilayah dataran rendah sekitar Rawa Pening pada saat pengambilan sampel masih layak ditinjau dari parameter nitrat dan belum menunjukkan indikasi pencemaran yang melampaui standar yang berlaku. Meskipun demikian, perhatian khusus perlu diberikan pada titik S1 Pasar Jambu dengan nilai 8,285 mg/L dan titik S3 di Sekolah dengan nilai 7,469 mg/L yang mencatat konsentrasi mendekati separuh dari nilai ambang batas baku mutu yang ditetapkan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa meskipun saat ini masih aman secara regulasi, tren peningkatan konsentrasi nitrat di kedua titik tersebut patut diwaspadai, mengingat aktivitas pertanian dan kepadatan permukiman di sekitar wilayah studi berpotensi terus meningkatkan masukan nitrogen ke dalam akuifer seiring dengan perkembangan wilayah. Apabila tidak dilakukan pengelolaan yang memadai terhadap penggunaan pupuk nitrogen dan pengelolaan limbah domestik di sekitar titik-titik tersebut, tidak menutup kemungkinan konsentrasi nitrat akan terus

meningkat dan berpotensi mendekati atau bahkan melampaui ambang batas pada pemantauan di masa mendatang.

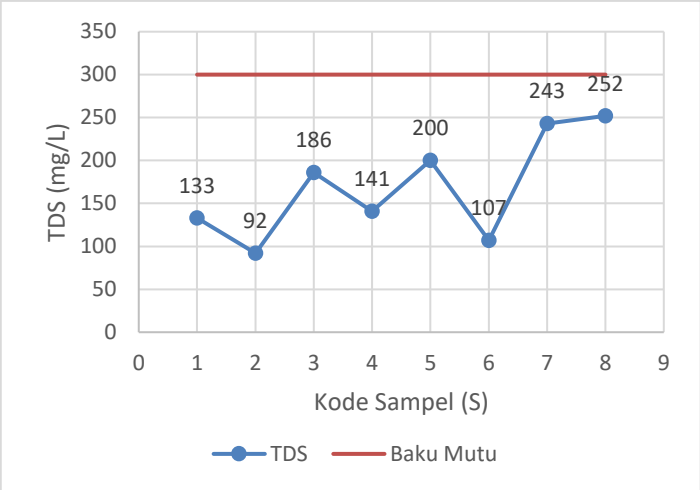
4.3 Analisis Hubungan Nitrat dengan Parameter Lain

4.3.1 Analisis Hubungan Parameter Nitrat dan *Total Dissolved Solid* (TDS)

TDS (*Total Dissolved Solid*) merupakan jumlah keseluruhan material yang terlarut di dalam air, yang dapat berupa karbonat, bikarbonat, klorida, sulfat, fosfat, nitrat, kalsium, magnesium, natrium, ion-ion organik, senyawa koloid, dan lain-lain (WHO, 2022). Dengan demikian, nitrat hanyalah salah satu komponen kecil dari TDS, bukan satu-satunya penyusunnya. TDS mencakup garam-garam anorganik seperti natrium, magnesium, kalsium, dan kalium sebagai kation, serta klorida, sulfat, nitrat, dan bikarbonat sebagai anion, ditambah partikel organik terlarut lainnya. Hal ini menjadi dasar mengapa TDS tidak dapat dijadikan proksi langsung untuk menilai tingkat pencemaran nitrat secara spesifik di suatu perairan.

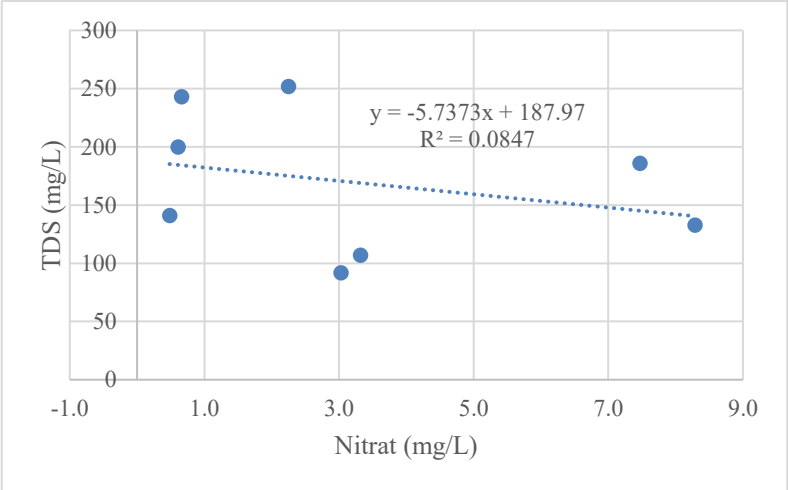
Tabel 4.2 Hasil Pengujian TDS

Kode Sampel	TDS (mg/L)	Baku Mutu (mg/L)
S1	133	<300
S2	92	
S3	186	
S4	141	
S5	200	
S6	107	
S7	243	
S8	252	
Nilai Maximum	**252**	
Nilai Minimum	**92**	
Rerata	**169,25**	



Gambar 4.4 Hasil Pengujian TDS

Berdasarkan data yang didapatkan rentang nilai TDS dari delapan titik sampling yaitu 92 mg/L sampai 252 mg/L. Seluruh nilai konsentrasi TDS yang terukur masih berada di bawah ambang batas maksimum yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023. Regulasi tersebut menetapkan kadar maksimum TDS yang diperbolehkan dalam air minum < 300 mg/L.



Gambar 4.5 Grafik Hubungan Nitrat dan TDS

Grafik hubungan nitrat dan TDS pada Gambar 4.5 menunjukkan persamaan regresi linear $y = -5{,}7373x + 187{,}97$ dengan nilai koefisien determinasi $R^2 = 0{,}0847$. Nilai R^2 yang sangat rendah mengindikasikan bahwa hanya sekitar 8,47% variasi TDS yang dapat dijelaskan oleh variasi konsentrasi nitrat, sedangkan sisanya dipengaruhi oleh faktor-faktor lain di luar nitrat. Lemahnya korelasi antara nitrat dan TDS di wilayah studi dapat dipahami dengan data pada titik-titik tertentu yang

menunjukkan pola anomali. S8 memiliki nilai TDS tertinggi di antara seluruh titik sebesar 252 mg/L, namun konsentrasi nitratnya hanya 2,246 mg/L yang termasuk kategori sedang-rendah. Sebaliknya, S1 yang memiliki nitrat tertinggi 8,285 mg/L justru hanya memiliki TDS sebesar 133 mg/L. Pola yang saling berlawanan ini mengkonfirmasi bahwa TDS tinggi di S8 bukan disebabkan oleh nitrat, melainkan oleh ion-ion mineral terlarut lain yang berasal dari interaksi air tanah dengan sedimen dan air danau di sekitar zona litoral Rawa Pening. Ketika air tanah bergerak melalui batuan dan sedimen penyusun akuifer, sebagian mineral dalam material tersebut larut melalui proses pelapukan, sehingga air tanah yang telah lama berada dalam akuifer memiliki konsentrasi TDS yang lebih tinggi akibat kontak yang lebih lama dengan material akuifer (Abas et al. 2021). Kondisi ini menjelaskan mengapa S7 dan S8 yang berada dekat danau dengan sumur yang lebih dalam dan kondisi anoksik memiliki TDS tinggi namun nitrat rendah TDS mereka lebih banyak dikontribusi oleh mineral alami dari interaksi air tanah dengan material akuifer dan air danau, bukan dari kontaminan antropogenik seperti nitrat. Penting untuk dipahami bahwa nilai TDS semata hanyalah pengukuran terhadap total padatan terlarut dalam air, bukan pernyataan mengenai apakah zat-zat tersebut berbahaya atau tidak, karena banyak padatan terlarut seperti kalsium dan magnesium bersifat tidak berbahaya dan merupakan mineral alami.

Berdasarkan hasil tersebut tidak terdapat hubungan yang signifikan antara TDS dan konsentrasi nitrat di air tanah wilayah studi. TDS bukan merupakan proksi yang tepat untuk menilai tingkat pencemaran nitrat di wilayah sekitar Rawa Pening, karena komposisi TDS di setiap titik lebih banyak dipengaruhi oleh mineral-mineral terlarut alami yang bervariasi tergantung pada litologi akuifer, kedalaman sumur, dan kedekatan dengan badan air danau, dibandingkan oleh kontribusi nitrat dari aktivitas antropogenik di permukaan. Dengan demikian, untuk menilai pencemaran nitrogen di wilayah studi, pengujian nitrat secara spesifik tetap diperlukan dan tidak dapat digantikan oleh pengukuran TDS semata.

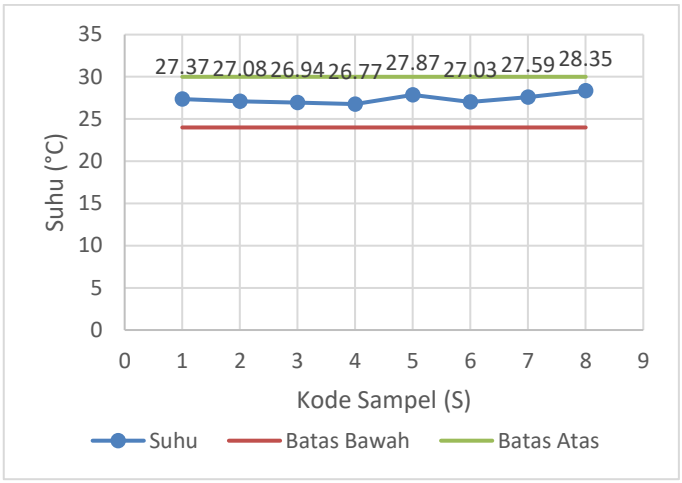
4.3.2 Analisis Hubungan Parameter Nitrat dan Suhu

Suhu merupakan salah satu faktor lingkungan yang secara teoritis berpengaruh terhadap konsentrasi nitrat dalam air tanah melalui pengaruhnya terhadap laju reaksi biologis, khususnya proses nitrifikasi. Suhu air memiliki

pengaruh yang kuat terhadap laju pertumbuhan bakteri nitrifikasi, di mana berbagai penelitian menyatakan bahwa nitrifikasi lebih sering terjadi pada suhu yang lebih hangat (Daims & Wagner, 2022). Sebagian besar bakteri nitrifikasi tumbuh secara optimal pada suhu antara 25 hingga 30°C. Hal ini berarti bahwa pada kondisi suhu optimal tersebut, proses konversi amonia menjadi nitrat berlangsung lebih cepat dan lebih sempurna, sehingga secara teoritis menghasilkan akumulasi nitrat yang lebih tinggi di dalam air tanah. Sebaliknya, ketika suhu menurun sebesar 10°C, laju nitrifikasi secara umum akan menurun hingga 50%, dan penurunan suhu secara mendadak dapat menyebabkan penurunan laju nitrifikasi yang bahkan lebih besar dari 50%. Dengan demikian, suhu bukan hanya memengaruhi seberapa cepat nitrat terbentuk, tetapi juga seberapa banyak nitrat yang dihasilkan dari proses nitrifikasi dalam satuan waktu tertentu. Dalam proses biologis, laju reaksi nitrifikasi meningkat seiring dengan kenaikan suhu hingga mencapai suhu optimal, namun di atas suhu optimal tersebut protein enzimatis akan mengalami denaturasi dan laju reaksi justru menurun.

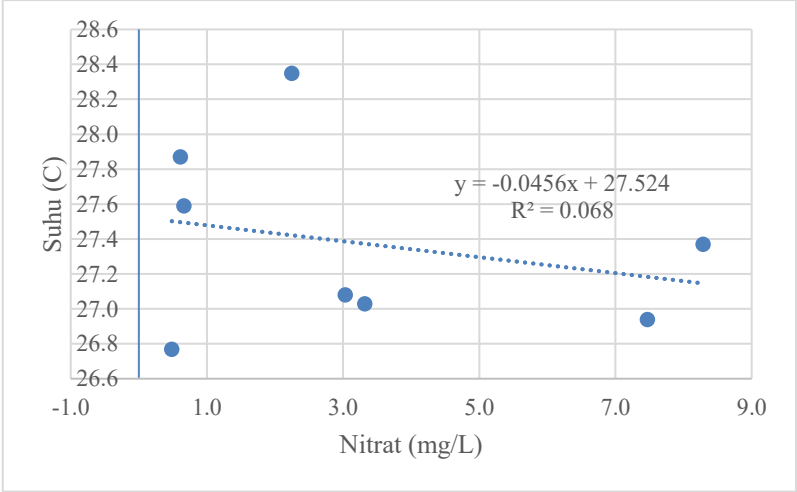
Tabel 4.3 Hasil Pengujian Suhu

Kode Sampel	**Suhu (°C)**	**Baku Mutu (°C)**
S1	27.37	Suhu Udara ± 3
S2	27.08	
S3	26.94	
S4	26.77	
S5	27.87	
S6	27.03	
S7	27.59	
S8	28.35	
Nilai Maximum	**28,35**	
Nilai Minimum	**26,77**	
Rerata	**27,37**	



Gambar 4.6 Grafik Hasil Pengujian Suhu

Berdasarkan data yang didapatkan rentang Suhu dari delapan titik sampling yaitu 26,77°C sampai 28,35°C. Seluruh suhu yang terukur masih berada dalam rentang batas suhu udara di lokasi yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023. Regulasi tersebut menetapkan baku mutu parameter fisik yaitu suhu udara ± 3.



Gambar 4.7 Grafik Hubunngan Nitrat dan Suhu

Berdasarkan grafik hubungan nitrat dan suhu pada Gambar 4.7 yang diperoleh dari delapan titik sampling, nilai koefisien determinasi yang dihasilkan menunjukkan korelasi yang sangat lemah. Keseragaman suhu antar titik yang hanya berkisar antara 26,77°C hingga 28,35°C dengan rentang variasi hanya sebesar 1,58°C menjadikan suhu hampir tidak memiliki variasi yang cukup untuk menghasilkan perbedaan laju nitrifikasi yang bermakna antar titik. Rentang suhu

yang sangat sempit ini secara matematis akan menghasilkan nilai R^2 yang sangat rendah dan mendekati nol, yang berarti variasi suhu tidak mampu menjelaskan variasi konsentrasi nitrat yang terjadi antar titik sampling. Dalam konteks statistik, korelasi antara dua variabel hanya dapat terdeteksi secara bermakna apabila kedua variabel tersebut memiliki variasi yang cukup besar, sedangkan dalam data ini suhu berperilaku hampir seperti konstanta sehingga nilai korelasinya tidak dapat diinterpretasikan sebagai hubungan yang bermakna secara biologis.

Keseragaman suhu air tanah di seluruh titik sampling merupakan karakteristik yang umum dijumpai pada air tanah dangkal di wilayah tropis. Air tanah, tidak seperti air permukaan, terlindungi dari paparan langsung sinar matahari dan fluktuasi suhu udara oleh lapisan tanah di atasnya, sehingga suhunya cenderung stabil mengikuti suhu rata-rata wilayah setempat. Di wilayah sekitar Rawa Pening yang berada pada iklim tropis lembab, suhu air tanah yang berkisar antara 26,77°C sampai 28,35°C pada seluruh titik mencerminkan kondisi termal yang relatif homogen di seluruh wilayah studi. Kadar nitrat pada suatu lokasi dipengaruhi oleh berbagai parameter kualitas perairan yaitu salinitas, suhu, DO, dan pH secara bersama-sama, namun dalam kondisi di mana suhu hampir seragam, kontribusi suhu terhadap perbedaan distribusi nitrat antar titik menjadi tidak signifikan dan parameter lain seperti DO, pH, dan penggunaan lahan menjadi faktor penentu yang jauh lebih dominan.

Berdasarkan nilai R^2 yang sangat rendah dari grafik dan keseragaman suhu yang hanya bervariasi dalam rentang 1,58°C di antara seluruh titik sampling, dapat disimpulkan bahwa tidak terdapat hubungan yang signifikan antara suhu dan konsentrasi nitrat di air tanah wilayah studi. Meskipun secara teoritis suhu berpengaruh terhadap laju nitrifikasi dan pembentukan nitrat, pengaruh tersebut hanya akan terlihat secara nyata apabila terdapat perbedaan suhu yang cukup besar antar titik pengamatan. Keseragaman suhu air tanah di seluruh titik sampling menjadikannya bukan faktor pembeda distribusi nitrat di wilayah studi ini, dan distribusi nitrat yang sangat bervariasi antar titik (0,483–8,285 mg/L) lebih tepat dijelaskan melalui perbedaan intensitas masukan nitrogen dari penggunaan lahan di permukaan, kondisi redoks akuifer yang dicerminkan oleh nilai DO, serta

kedalaman sumur yang menentukan kapasitas perlindungan alami terhadap kontaminasi dari permukaan.

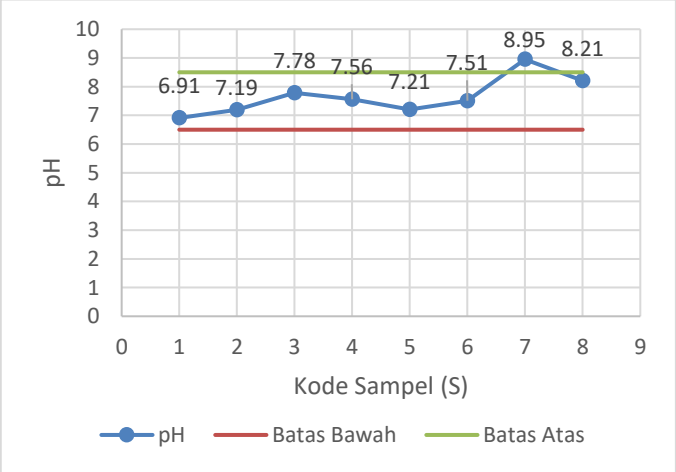
4.3.3 Analisis Hubungan Parameter Nitrat dan pH

pH memiliki pengaruh paling langsung terhadap konsentrasi nitrat melalui dua jalur biologis yang berlawanan arah, yaitu nitrifikasi dan denitrifikasi. Tingkat reaksi nitrifikasi sangat tergantung pada sejumlah faktor lingkungan, di antaranya adalah substrat dan konsentrasi oksigen, suhu, pH, dan adanya zat beracun atau zat yang menghambat proses nitrifikasi. Dari sisi nitrifikasi, pH optimum untuk terjadinya proses nitrifikasi adalah pada kondisi pH 7,5–8,5 yang mampu menghasilkan konsentrasi nilai nitrat yang tinggi, dan reaksi nitrifikasi akan berhenti pada kondisi pH kurang dari 6. Artinya, pada kondisi pH yang mendekati netral hingga sedikit basa, bakteri nitrifikasi seperti *Nitrosomonas* dan *Nitrobacter* bekerja paling efisien dalam mengoksidasi amonia menjadi nitrat (Duan et al, 2023).

Dari sisi denitrifikasi proses yang justru mendegradasi nitrat pH juga memainkan peran yang sangat penting. Rentang pH yang disukai oleh bakteri denitrifikasi heterotrof umumnya berada antara 7-8, dan nilai pH di luar rentang ini dapat menghambat proses denitrifikasi, meskipun pH optimal bersifat spesifik terhadap lokasi karena pengaruh aklimatisasi dan adaptasi pada ekosistem mikroba setempat (Wang & Chu, 2021). Kondisi tanah yang asam menunjukkan laju denitrifikasi yang lebih rendah dan rasio N_2O/N_2 yang lebih tinggi dibandingkan tanah yang bersifat basa, sehingga denitrifikasi yang tidak sempurna lebih sering terjadi pada kondisi pH asam. Ini berarti pada kondisi pH asam, nitrat yang terbentuk dari nitrifikasi tidak dapat didegradasi secara efisien oleh denitrifikasi, sehingga nitrat cenderung terakumulasi di dalam air tanah. Sebaliknya, pada kondisi pH lebih tinggi, seiring dengan meningkatnya pH, laju spesifik reduksi nitrat oleh bakteri denitrifikasi juga meningkat.

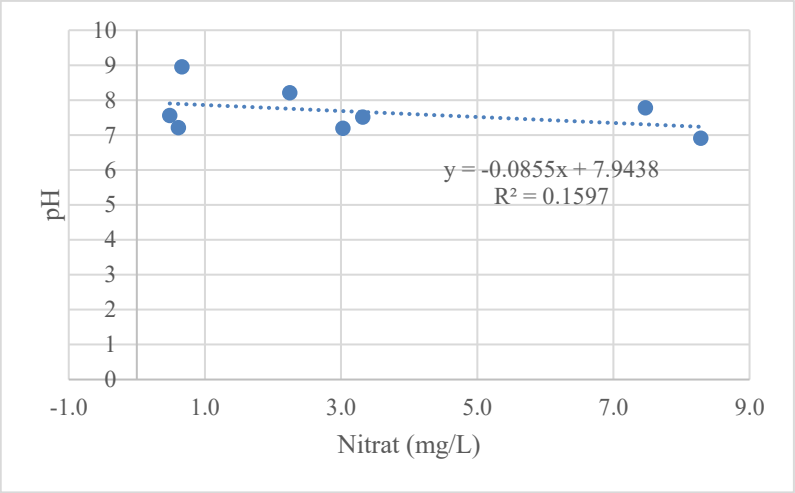
Tabel 4.4 Hasil Pengujian pH

Kode Sampel	pH	Baku Mutu
S1	6.91	6,5 - 8.5
S2	7.19	
S3	7.78	
S4	7.56	
S5	7.21	
S6	7.51	
S7	8.95	
S8	8.21	
Nilai Maximum	**8,95**	
Nilai Minimum	**6,91**	
Rerata	**7,66**	



Gambar 4.8 Grafik Hasil Pengujian pH

Berdasarkan data yang didapatkan rentang nilai pH dari delapan titik sampling yaitu 6,91 sampai 8,95. Hampir seluruh nilai pH yang terukur masih berada direntang ambang batas yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 dengan nilai pH yang diperbolehkan dalam air minum 6,5 - 8.5. Namun, terdapat satu titik yang nilai pH diatas ambang batas yaitu pada titik S7 dengan pH 8,95.



Gambar 4.9 Grafik Hubungan Nitrat dan pH

Data dari delapan titik sampling pada Gambar 4.9 menunjukkan pola yang sangat konsisten dengan. Titik S1 dengan pH terendah 6,91 didapatkan konsentrasi nitrat tertinggi yaitu 8,285 mg/L, sedangkan titik S7 dengan pH tertinggi 8,95 justru memiliki konsentrasi nitrat yang termasuk paling rendah 0,662 mg/L. Pola terbalik antara pH dan nitrat ini juga terkonfirmasi dari penelitian air tanah serupa di wilayah Indonesia, di mana terdapat hubungan yang cukup kuat antara pH dan kandungan nitrat air tanah, di mana semakin besar kandungan nitrat dalam air maka pH air akan semakin kecil, dan hal ini dapat dijelaskan bahwa proses nitrifikasi terjadi optimum pada pH 8–9 sedangkan pada pH kurang dari 6 reaksi akan berhenti (Sutrisno, 2021; Wijaya et al, 2023).

Berdasarkan Gambar 4.9 hubungan pH dan nitrat pada delapan titik sampling, persamaan regresi yang terbentuk menunjukkan arah negatif yang konsisten seiring meningkatnya pH, konsentrasi nitrat cenderung menurun. Nilai koefisien determinasi R^2 yaitu 0,1597 yang dihasilkan mencerminkan seberapa besar proporsi variasi nitrat yang dapat dijelaskan oleh variasi pH. Dibandingkan dengan TDS pada Gambar 4.5 dengan R^2 yaitu 0,0847 dan suhu yang hampir tidak bervariasi, hubungan pH dengan nitrat menunjukkan kekuatan korelasi yang lebih baik, meskipun data diinterpretasikan tidak cukup representatif mengingat jumlah titik sampling yang hanya delapan. Arah negatif pada grafik ini secara konsep sangat masuk akal dengan pH rendah menghambat denitrifikasi sehingga nitrat terakumulasi, sementara pH tinggi mendukung denitrifikasi yang mendegradasi nitrat.

Namun demikian, bahwa hubungan pH dengan nitrat di wilayah studi ini bersifat tidak murni sebab-akibat searah. pH rendah tidak secara langsung menghasilkan nitrat, melainkan menciptakan kondisi lingkungan yang tidak kondusif bagi bakteri denitrifikasi untuk mendegradasi nitrat yang sudah ada. Faktor penggunaan lahan dan masukan nitrogen dari permukaan tetap menjadi sumber primer nitrat, sedangkan pH berperan sebagai faktor pengendali sekunder yang menentukan seberapa banyak nitrat yang dapat terdegradasi secara biologis sebelum terakumulasi di dalam akuifer.

Meskipun pola umum terbalik antara pH dan nitrat terkonfirmasi pada sebagian besar titik, terdapat satu hal yang perlu dicermati pada titik S7 memiliki pH tertinggi 8,95 dengan nitrat rendah 0,662 mg/L, namun berdasarkan teori, pH yang sangat tinggi justru seharusnya mulai menghambat denitrifikasi. Dalam kasus S7, rendahnya nitrat kemungkinan lebih banyak dikendalikan oleh kondisi DO yang sangat rendah 0,05 mg/L yang menciptakan lingkungan anoksik penuh, sehingga denitrifikasi berlangsung aktif secara fisik terlepas dari pengaruh pH. Ini menegaskan bahwa pH dan DO bekerja secara sinergis dalam menentukan konsentrasi nitrat akhir di setiap titik, dan tidak dapat diinterpretasikan secara terpisah.

Berdasarkan pola data, dukungan teori, dan hasil grafik, dapat disimpulkan bahwa terdapat hubungan negatif antara pH dan konsentrasi nitrat di air tanah wilayah studi, di mana titik dengan pH lebih rendah cenderung memiliki nitrat lebih tinggi dan sebaliknya. Hubungan ini lebih kuat dan lebih bermakna secara biologis dibandingkan hubungan nitrat dengan TDS maupun suhu, karena pH secara langsung memengaruhi aktivitas enzimatis bakteri denitrifikasi yang bertanggung jawab mendegradasi nitrat di dalam akuifer. Meskipun demikian, pH bukan satu-satunya faktor penentu distribusi nitrat di wilayah studi pengaruhnya bekerja bersama-sama dengan DO, kedalaman sumur, dan intensitas masukan nitrogen dari penggunaan lahan di permukaan sebagai sistem pengendali yang saling berinteraksi.

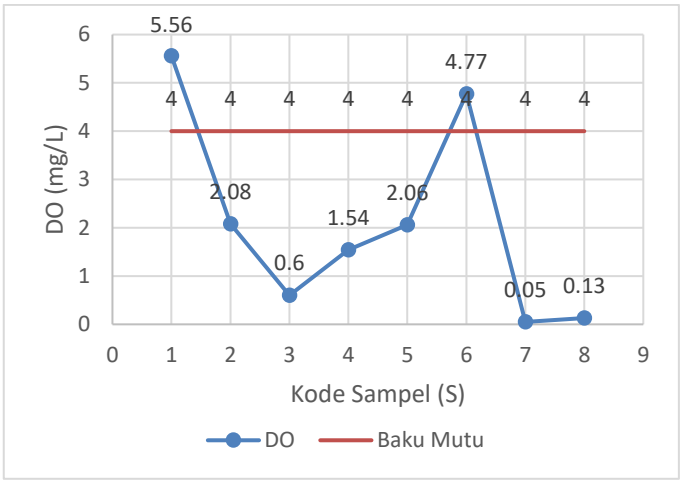
4.3.4 Analisis Hubungan Parameter Nitrat dan *Dissolved Oxygen* (DO)

Dissolved Oxygen (DO) merupakan parameter yang paling erat kaitannya dengan konsentrasi nitrat di antara seluruh parameter yang diuji dalam penelitian ini, karena DO secara langsung mengendalikan jalur transformasi nitrogen yang

terjadi di dalam akuifer melalui dua proses yang berlawanan. Pada kondisi aerobik dengan DO tinggi, bakteri nitrifikasi menggunakan oksigen terlarut untuk mengoksidasi amonia menjadi nitrat melalui reaksi nitrifikasi yang berjalan sempurna. Bakteri aerobik heterotrof, bakteri amonifikasi, dan bakteri nitrifikasi dalam sedimen berkorelasi positif dengan konsentrasi DO, dan peningkatan suplai oksigen memberikan efek positif terhadap nitrifikasi sehingga menghasilkan akumulasi nitrat yang lebih tinggi. Sebaliknya, pada kondisi anoksik dengan DO rendah, bakteri denitrifikasi menggunakan nitrat (NO_3) sebagai akseptor elektron pengganti oksigen dalam proses respirasi anaerobik, sehingga nitrat tereduksi menjadi gas nitrogen (N_2) yang terlepas ke atmosfer. Dalam keadaan anaerob, reaksi nitrifikasi tidak dapat berlangsung, sehingga reduksi nitrat dapat meningkat dalam kondisi oksigen terlarut yang rendah, dan jika oksigen terlarut dalam badan air tinggi maka akan menghasilkan nitrat yang tinggi pula, sehingga hubungan antara konsentrasi oksigen terlarut dan nitrat dalam air adalah berbanding lurus. Dengan demikian, DO merupakan pengendali utama yang menentukan apakah nitrogen anorganik di suatu titik akan terakumulasi sebagai nitrat atau terdenitrifikasi menjadi gas yang tidak berbahaya.

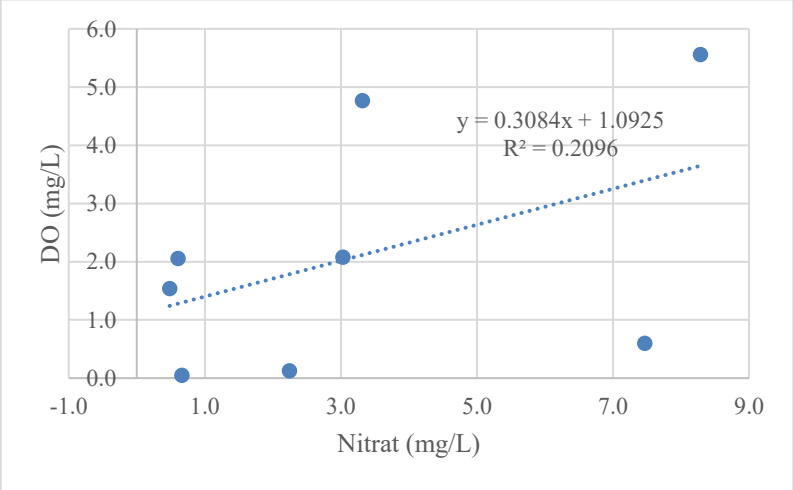
Tabel 4.5 Hasil Pengujian DO

Kode Sampel	**DO (mg/L)**	**Baku Mutu (mg/L)**
S1	5.56	≥ 4
S2	2.08	
S3	0.6	
S4	1.54	
S5	2.06	
S6	4.77	
S7	0.05	
S8	0.13	
Nilai Maximum	**5,56**	
Nilai Minimum	**0,05**	
Rerata	**2,099**	



Gambar 4.10 Grafik Hasil Pengujian DO

Berdasarkan data yang didapatkan rentang nilai DO dari delapan titik sampling yaitu 0,05 mg/L sampai 5,56 mg/L. Nilai DO yang terukur hanya ada dua titik yang memenuhi baku mutu yaitu titik S1 dengan nilai DO 5,56 mg/L dan titik S6 dengan nilai DO 4,77 berada diatas batas minimum yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023. Sedangkan nilai DO pada enam titik lainnya tidak memenuhi baku mutu. Regulasi tersebut menetapkan kadar minimum DO yang diperbolehkan dalam air minum ≥ 4 mg/L.



Gambar 4.11 Grafik Hubungan Nitrat dan DO

Grafik hubungan DO dan nitrat yang ditunjukkan pada Gambar 4.11 menunjukkan persamaan regresi dengan arah positif, di mana peningkatan DO diikuti oleh kecenderungan peningkatan konsentrasi nitrat. Nilai koefisien determinasi R^2 yaitu 0,2096 yang dihasilkan dari grafik ini merupakan yang

tertinggi di antara seluruh parameter yang diuji, yang mengindikasikan bahwa DO memiliki hubungan yang paling kuat dengan nitrat di antara seluruh parameter yang dianalisis. Nilai koefisien korelasi R yang bertanda positif menunjukkan korelasi positif sedang hingga kuat, mengkonfirmasi pola bahwa titik dengan DO tinggi cenderung memiliki nitrat yang lebih tinggi dan sebaliknya. Enam dari delapan titik sampling, pola ini terpenuhi secara konsisten.

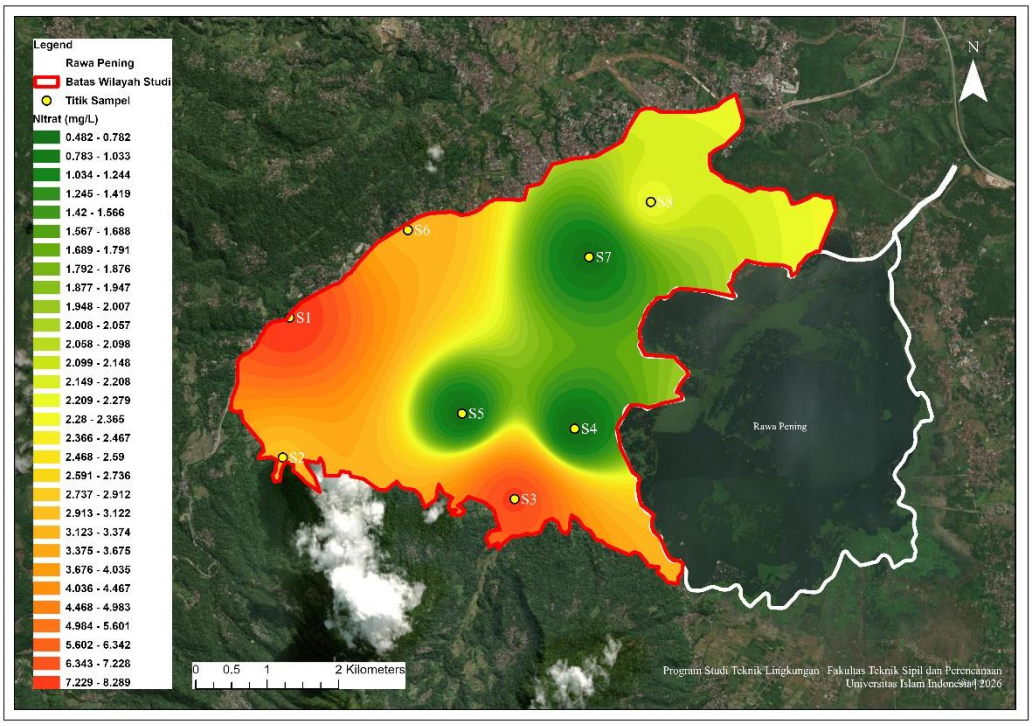
Satu-satunya titik yang menjadi pengecualian signifikan dari pola umum ini adalah titik S3, yang memiliki DO sangat rendah yaitu 0,60 mg/L namun nilai nitrat yang cenderung tinggi (7,469 mg/L). Temuan ini dapat dijelaskan melalui tiga mekanisme yang saling melengkapi. Pertama, terdapat masukan nitrat eksternal yang masif dan berkelanjutan dari limpasan pupuk pertanian sawah dan rembesan septik tank di sekitar S3, sehingga laju masukan nitrat dari permukaan melebihi laju degradasinya melalui denitrifikasi di dalam akuifer. Kedua, nitrat yang terdeteksi kemungkinan merupakan nitrat yang baru terinfiltrasi terbentuk di zona vadose yang masih aerobik melalui nitrifikasi aktif, kemudian terinfiltrasi ke akuifer dalam waktu singkat sebelum sempat terdenitrifikasi, sehingga kondisi DO di dalam akuifer sudah menurun namun nitrat yang baru masuk belum terdegradasi. Studi pada akuifer aluvial menunjukkan bahwa nitrifikasi dan denitrifikasi tidak selalu terjadi secara ketat pada kondisi aerobik dan anoksik saja terdapat bukti terjadinya denitrifikasi di zona oksik atas dan nitrifikasi di lapisan anoksik bawah akuifer yang terstratifikasi, yang menghasilkan konsentrasi nitrat lebih tinggi dari yang diperkirakan meski kondisi DO rendah. Ketiga, keterbatasan karbon organik sebagai donor elektron bagi bakteri denitrifikasi, meskipun kondisi anoksik sudah terpenuhi secara fisik ditunjukkan dari nilai DO yang rendah, denitrifikasi biologis tidak dapat berlangsung efisien tanpa ketersediaan karbon organik yang cukup sebagai sumber energi bagi bakteri denitrifikasi heterotrof, sehingga nitrat tetap terakumulasi meskipun kondisi oksigen sudah mendukung.

Berdasarkan nilai R^2 tertinggi di antara seluruh parameter yang dianalisis, dukungan teori yang sangat kuat, dan konsistensi pola pada enam dari delapan titik sampling, dapat disimpulkan bahwa DO merupakan parameter yang memiliki hubungan paling signifikan dan paling bermakna secara biologis terhadap konsentrasi nitrat di air tanah wilayah studi, dengan arah korelasi positif semakin

tinggi DO maka semakin tinggi pula nitrat yang terakumulasi. DO bertindak sebagai pengendali utama distribusi nitrat melalui pengaruhnya terhadap keseimbangan antara proses nitrifikasi dan denitrifikasi di dalam akuifer. Temuan pada titik S3 tidak melemahkan kesimpulan ini, melainkan justru memperkaya pemahaman bahwa intensitas masukan nitrogen dari permukaan lahan dapat menjadi faktor yang lebih dominan dibandingkan kondisi redoks akuifer pada kasus tertentu, sehingga pengelolaan sumber nitrat dari permukaan tetap menjadi prioritas utama dalam upaya perlindungan kualitas air tanah di wilayah sekitar Rawa Pening.

4.4 Analisis Pola Persebaran Parameter Nitrat

Peta sebaran yang dihasilkan melalui metode interpolasi pada Gambar 4.12 menampilkan gradasi warna dari merah-oranye yang merepresentasikan konsentrasi tinggi di bagian barat dan selatan wilayah studi hingga hijau tua yang merepresentasikan konsentrasi rendah di bagian timur yang berbatasan langsung dengan Rawa Pening. Secara visual, terdapat dua sumber titik konsentrasi tinggi yang terlihat jelas pada peta, yaitu di sekitar titik S1 di bagian barat dan di sekitar titik S3 di bagian selatan-tengah, yang keduanya ditunjukkan dengan warna merah hingga oranye. Sementara itu, zona hijau tua yang mencerminkan konsentrasi nitrat rendah mendominasi area yang berdekatan dengan badan danau di sisi timur, khususnya di sekitar titik S7 dan titik S8. Gradasi warna yang terbentuk secara umum membentuk pola konsentris tidak beraturan dengan pusat konsentrasi tinggi di sisi barat-selatan dan penurunan konsentrasi yang semakin signifikan ke arah timur mendekati danau.



Gambar 4.12 Peta Sebaran Konsentrasi Nitrat

Gambar 4.12 menunjukkan pola terbalik antara kedekatan dengan danau dan konsentrasi nitrat, yang bertentangan dengan asumsi awal bahwa danau sebagai badan air besar akan menjadi sumber atau pengaruh utama kandungan nitrat di sekitarnya. Titik S1 yang merupakan titik paling jauh dari badan danau di sisi barat justru mencatat konsentrasi tertinggi yaitu 8,285 mg/L, sementara titik S7 dan titik S8 yang paling dekat dengan tepi danau di sisi timur mencatat konsentrasi paling rendah dengan konsentrasi 0,662 mg/L dan 2,246 mg/L. Pola ini mengindikasikan secara kuat bahwa Rawa Pening bukan merupakan sumber nitrat bagi air tanah di sekitarnya, melainkan justru sebaliknya kedekatan dengan danau menciptakan kondisi hidrogeologis yang secara alami menekan akumulasi nitrat. Berdasarkan penelitian Prasetyo (2022), konsentrasi nitrat di badan air Rawa Pening berkisar 0,882 mg/L hingga yang tertinggi pada konsentrasi 8,958 mg/L. Rendahnya akumulasi hara di badan air tersebut mengindikasikan bahwa sebaran kontaminan nitrat dari air tanah dangkal di sekitar dataran rendah Rawa Pening masih tertahan pada zona sistem akuifer setempat dan belum mengalami *discharge* secara masif menuju badan air utama Rawa Pening.

Titik S7 dan titik S8 yang berada dekat dengan danau berada di zona litoral yang memiliki muka air tanah sangat dangkal dan kondisi akuifer yang jenuh air, menciptakan kondisi anoksik hingga hampir anoksik penuh dengan nilai DO 0,05 mg/L, dan 0,13 mg/L yang secara aktif mendenitrifikasi nitrat sebelum sempat terakumulasi. Area di sekitar danau umumnya merupakan zona *discharge* air tanah, di mana aliran air tanah bergerak dari daratan menuju danau, sehingga nitrat yang terbawa aliran air tanah dari sumber-sumber di daratan sebagian besar telah mengalami denitrifikasi sepanjang jalur alirannya sebelum mencapai zona dekat danau. Dengan demikian, peta sebaran ini secara visual dan kuantitatif menegaskan bahwa jarak ke danau berbanding terbalik dengan konsentrasi nitrat di wilayah studi, dan bahwa ekosistem lahan basah danau berperan sebagai pelindung alami kualitas air tanah di zona litoral melalui mekanisme denitrifikasi yang intensif.

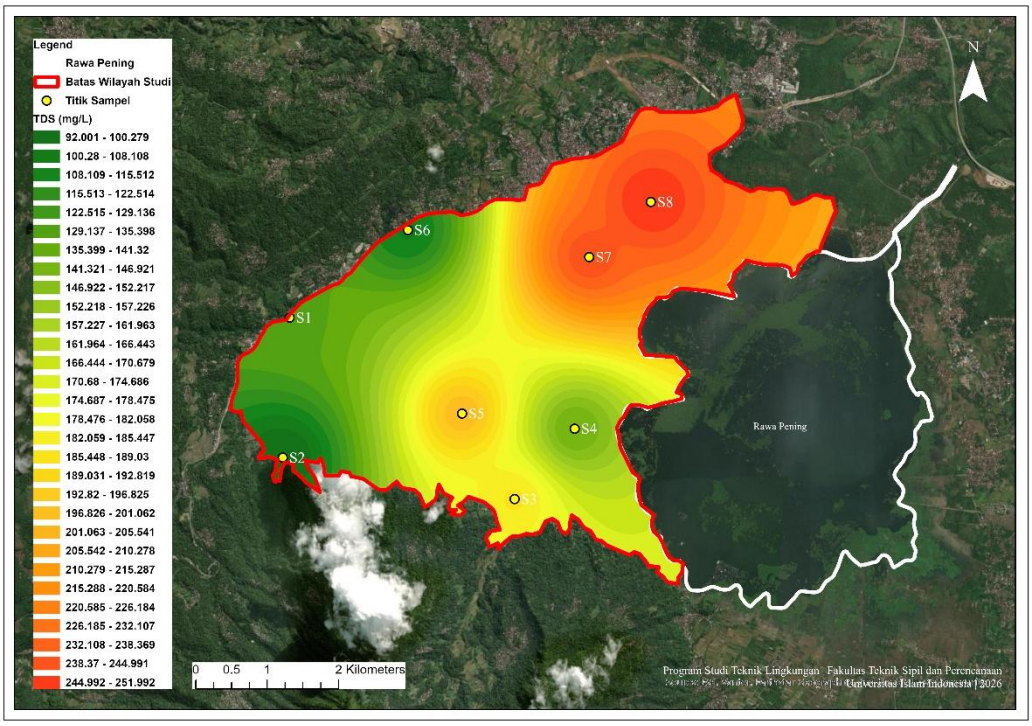
Zona merah-oranye >4 mg/L yang terpusat di sekitar titik S1 dan titik S3 bersesuaian secara spasial dengan kawasan yang didominasi oleh pertanian lahan kering, kebun campuran, dan permukiman pedesaan di bagian barat dan selatan wilayah studi. Di zona ini, kombinasi antara penggunaan pupuk nitrogen pada lahan pertanian lahan kering yang memiliki aerasi tanah baik serta rembesan limbah domestik dari permukiman menjadi sumber masukan nitrat yang dominan dan berkelanjutan. Pola dengan warna merah yang menyebar di sekitar kedua titik ini pada peta menggambarkan radius pengaruh dari kedua sumber utama tersebut yang memengaruhi kualitas air tanah dangkal di area sekitarnya.

Zona dengan warna kuning-hijau muda rentang konsentrasi 2–4 mg/L yang terlihat di bagian tengah wilayah studi di sekitar titik S5 dan titik S6 bersesuaian dengan zona transisi antara lahan pertanian dan kawasan semi-perkotaan Ambarawa yang sedang berkembang. Konsentrasi sedang di zona ini mencerminkan adanya tekanan dari dua sumber secara bersamaan pertanian dan limbah domestik permukiman namun dengan intensitas yang lebih moderat dibandingkan zona barat-selatan, ditambah dengan pengaruh denitrifikasi parsial pada akuifer yang mulai memasuki kondisi subanoksik.

Zona konsentrasi rendah yang digambarkan dengan warna hijau tua rentang konsentrasi <1,5 mg/L yang mendominasi bagian timur wilayah studi di sekitar titik S7 dan titik S8 bersesuaian dengan zona penyangga danau yang penggunaan

lahannya lebih terbuka dan tidak diintensifkan untuk pertanian, dengan tutupan lahan yang lebih bersifat alami. Di zona ini, meskipun terdapat permukiman di sekitar titik S7, kondisi hidrogeologis anoksik yang didominasi oleh pengaruh zona litoral danau terbukti jauh lebih dominan dalam menekan akumulasi nitrat dibandingkan kontribusi dari sumber-sumber antropogenik di permukaannya.

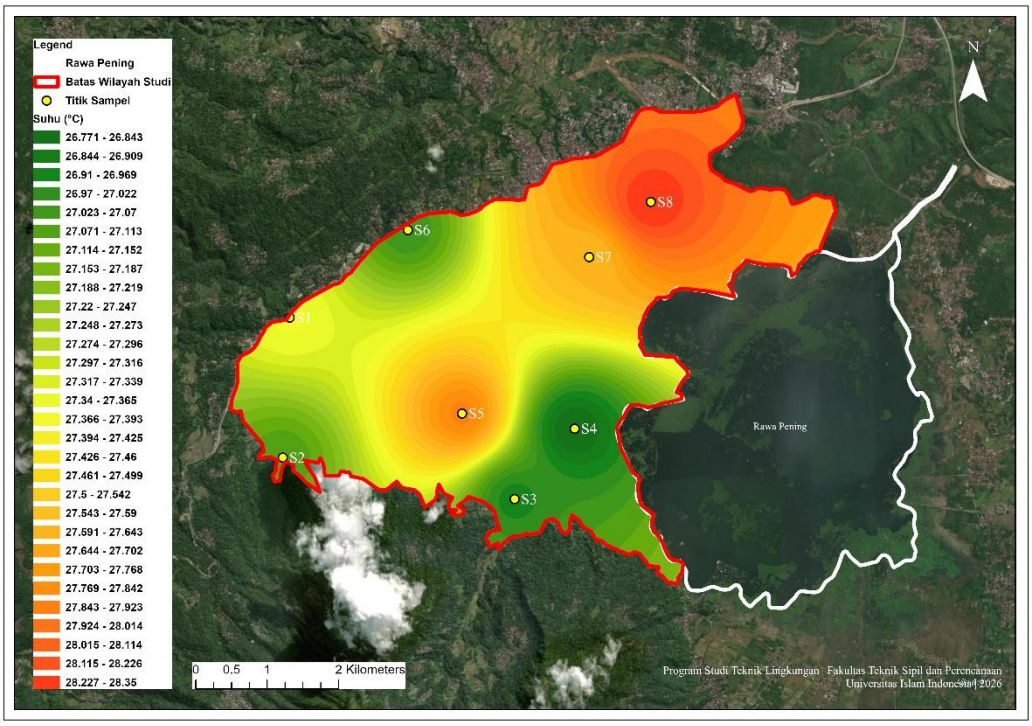
Secara keseluruhan, pola sebaran spasial nitrat pada peta menggambarkan dengan jelas bahwa distribusi nitrat di air tanah wilayah dataran rendah sekitar Rawa Pening dikendalikan oleh dua faktor dominan yaitu pada skala makro, jarak ke danau dan kondisi redoks akuifer yang berkaitan dengan kedekatan dengan zona lahan basah menjadi pengendali utama yang menentukan apakah nitrat dapat terakumulasi atau terdenitrifikasi pada skala lokal di dalam zona yang jauh dari danau, jenis, dan intensitas penggunaan lahan menjadi faktor pembeda yang menentukan seberapa besar masukan nitrogen ke dalam akuifer. Implikasi praktisnya adalah bahwa upaya pengendalian pencemaran nitrat di wilayah studi perlu difokuskan pada zona barat dan selatan yang ditunjukkan berwarna merah-oranye pada peta, khususnya melalui pengelolaan penggunaan pupuk nitrogen pada lahan pertanian dan perbaikan sistem sanitasi permukiman, karena zona tersebut merupakan area dengan risiko pencemaran nitrat air tanah yang paling tinggi dan berpotensi terus meningkat seiring dengan berkembangnya aktivitas pertanian dan permukiman di wilayah tersebut.



Gambar 4.13 Peta Sebaran Konsentrasi TDS

Peta sebaran TDS pada Gambar 4.13 menampilkan pola yang sangat berbeda dan bahkan berlawanan dengan peta sebaran nitrat, yang secara visual mempertegas temuan statistik bahwa TDS bukan proksi pencemaran nitrat di wilayah studi. Zona TDS tertinggi ditunjukkan dengan warna merah-oranye >200 mg/L pada peta TDS justru terkonsentrasi di bagian timur wilayah studi, khususnya di sekitar titik S7 dan titik S8 yang berdekatan dengan danau area yang pada peta nitrat justru menunjukkan warna hijau tua sebagai zona konsentrasi nitrat terendah. Sebaliknya, zona TDS terendah ditunjukkan dengan warna hijau tua <100 mg/L pada peta TDS terlihat di bagian barat di sekitar titik S1 dan titik S2, yang pada peta nitrat merupakan zona konsentrasi nitrat tertinggi. Pola spasial yang saling bertolak belakang antara kedua peta ini secara langsung menjelaskan mengapa korelasi statistik antara TDS dan nitrat menghasilkan nilai R^2 yang sangat rendah yaitu 0,0847. Tingginya TDS di zona dekat danau tepatnya pada titik S7 dan S8 mencerminkan akumulasi mineral-mineral terlarut alami yang berasal dari pelapukan material akuifer dan interaksi air tanah dengan air danau dalam jangka panjang bukan dari kontaminasi nitrat. Dengan demikian, pola sebaran spasial TDS yang berlawanan arah dengan pola sebaran nitrat membuktikan secara visual bahwa

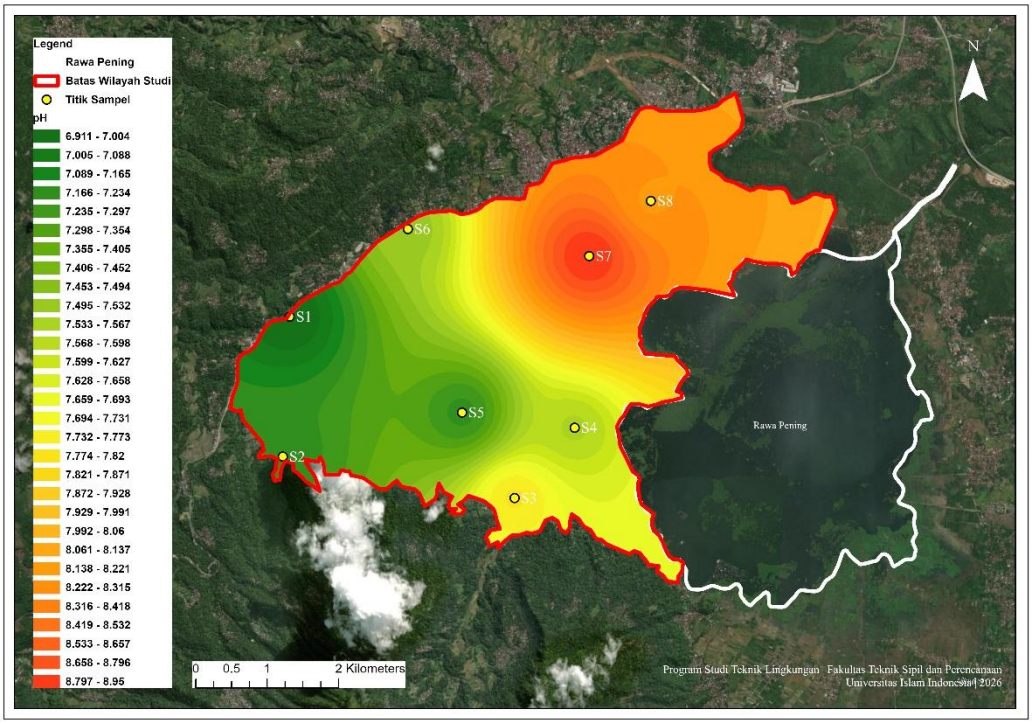
sumber TDS dan sumber nitrat di wilayah studi berasal dari proses yang berbeda dan lokasi yang berbeda, sehingga TDS tidak dapat digunakan sebagai indikator spasial pencemaran nitrat di wilayah sekitar Rawa Pening.



Gambar 4.14 Peta Sebaran Konsentrasi Suhu

Pada Gambar 4.14 menunjukkan gradasi sebaran Suhu yang relatif seragam di seluruh wilayah studi, dengan nilai berkisar antara 26,77–28,35°C. Zona suhu tertinggi yang ditunjukkan dengan warna merah-oranye terlihat di bagian utara-timur wilayah studi di sekitar titik S8, sementara suhu terendah ditunjukkan dengan warna hijau tua berada di bagian barat di sekitar titik S1 dan titik S2. Ketika dibandingkan dengan peta sebaran nitrat, tidak terlihat korespondensi spasial yang konsisten antara kedua peta tersebut. Titik S1 yang memiliki nitrat tertinggi justru berada di zona suhu yang lebih rendah pada peta, sedangkan Titik S8 yang berada di zona suhu tertinggi justru memiliki konsentrasi nitrat yang rendah. Ketidaksesuaian pola spasial antara kedua peta ini secara visual mengkonfirmasi temuan statistik sebelumnya bahwa suhu bukan faktor pengendali distribusi nitrat di wilayah studi. Rentang variasi suhu yang sangat sempit menjadikan perbedaan suhu antar zona tidak cukup signifikan untuk menciptakan perbedaan laju nitrifikasi yang bermakna secara spasial. Dengan demikian, meskipun suhu secara teoritis

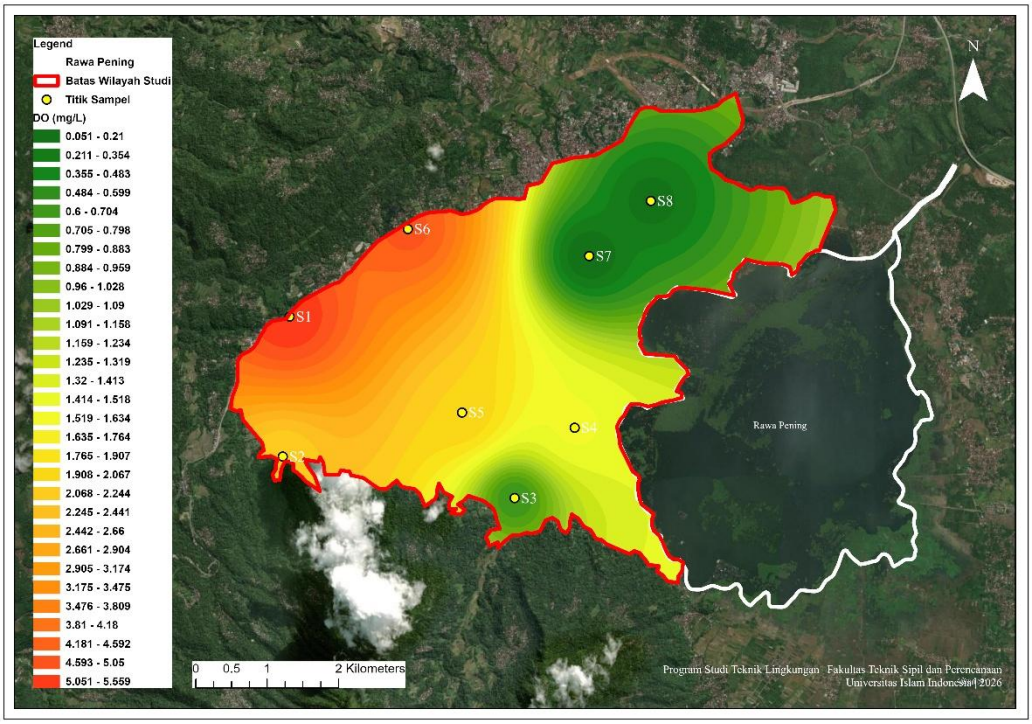
memengaruhi laju reaksi biologis dalam siklus nitrogen, keseragaman kondisi termal air tanah di wilayah tropis seperti sekitar Rawa Pening menjadikannya bukan faktor pembeda distribusi spasial nitrat, dan pola sebaran kedua parameter ini berjalan secara independen satu sama lain.



Gambar 4.15 Peta Sebaran Konsentrasi pH

Peta sebaran pH pada Gambar 4.15 menampilkan pola yang paling berlawanan secara spasial dibandingkan peta sebaran nitrat, dan ini merupakan temuan yang paling menarik secara visual di antara keempat parameter. Zona pH rendah dengan ditandai warna merah-oranye rentang pH 6,71–7,5 terkonsentrasi di bagian barat wilayah studi di sekitar titik S1 dan meluas ke selatan menuju titik S3, yang secara tepat bersesuaian dengan zona konsentrasi nitrat tertinggi pada peta nitrat. Sebaliknya, zona pH tinggi dengan warna hijau tua nilai pH >8,0 terlihat di bagian timur wilayah studi di sekitar titik S7 dan titik S8 yang berbatasan dengan danau, yang secara persis bersesuaian dengan zona konsentrasi nitrat terendah. Korespondensi spasial terbalik ini sangat jelas terlihat ketika kedua peta ditumpangtindihkan secara visual kantong warna merah-oranye pada peta nitrat tepat berada di lokasi yang sama dengan kantong warna merah-oranye pada peta pH, sementara zona hijau tua keduanya juga berimpit di sisi timur dekat danau. Pola

ini mengkonfirmasi secara spasial bahwa kondisi pH asam di bagian barat wilayah studi menghambat aktivitas bakteri denitrifikasi sehingga nitrat yang masuk dari sumber pertanian dan permukiman tidak terdegradasi dan terakumulasi, sementara kondisi pH lebih basa di dekat danau mendukung denitrifikasi yang lebih efisien sehingga nitrat tetap rendah. Overlay kedua peta ini secara visual memberikan bukti paling kuat tentang hubungan negatif yang bermakna secara spasial antara pH dan konsentrasi nitrat di wilayah studi.

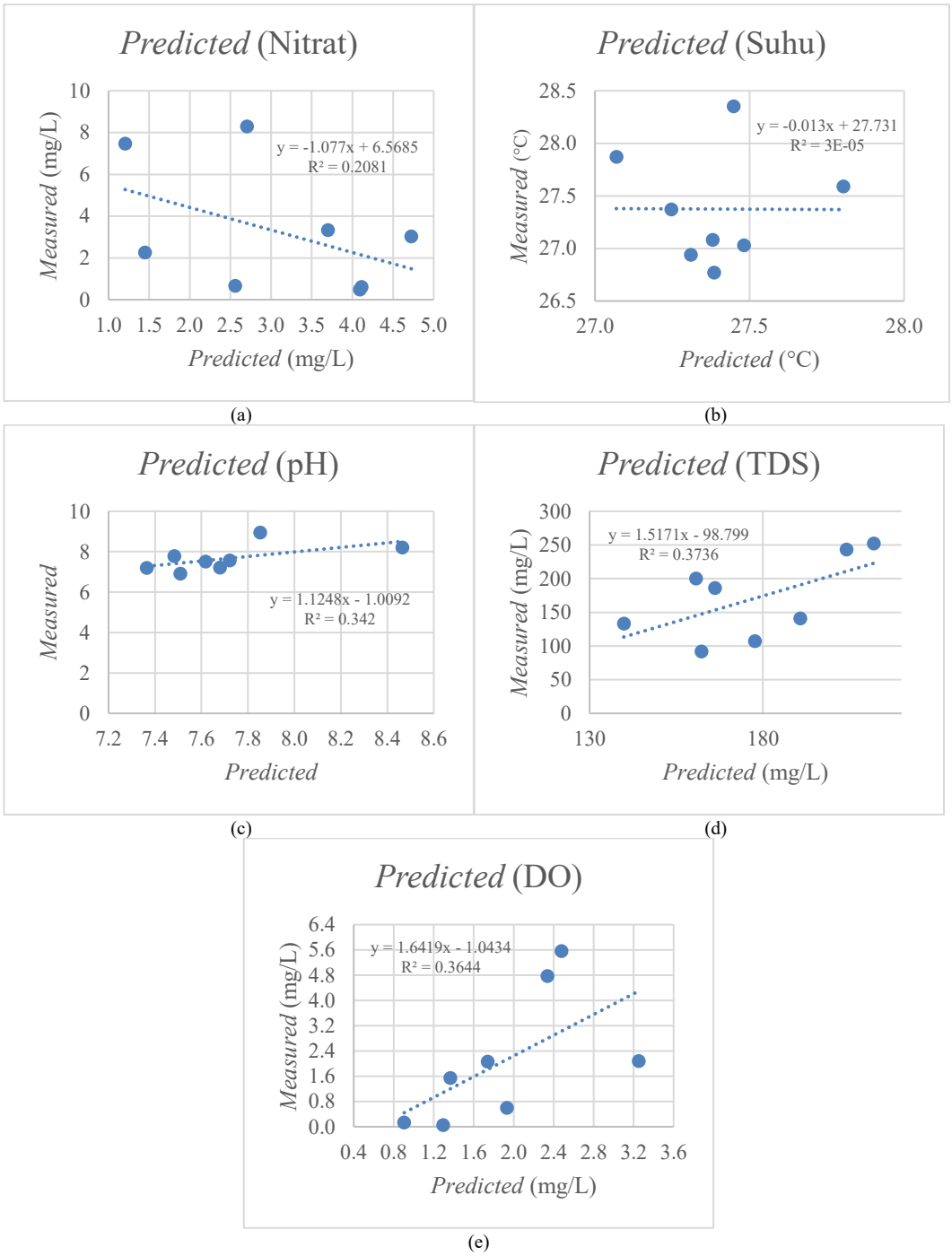


Gambar 4.16 Peta Sebaran Konsentrasi DO

Di antara keempat parameter yang dianalisis, peta sebaran DO Gambar 4.16 menunjukkan korespondensi spasial yang paling konsisten dan paling kuat dengan peta sebaran nitrat, dan ini secara visual mengkonfirmasi bahwa DO merupakan parameter pengendali utama distribusi nitrat di wilayah studi. Pola kedua peta ini hampir bersifat cermin satu sama lain secara spasial zona DO tertinggi ditunjukkan dengan warna merah-oranye nilai DO>4 mg/L pada peta DO terkonsentrasi di bagian barat wilayah studi di sekitar titik S1 dan titik S6, yang bersesuaian persis dengan zona nitrat tertinggi pada peta nitrat. Sebaliknya, zona DO terendah ditunjukkan dengan warna hijau tua nilai DO<0,5 mg/L pada peta DO mendominasi bagian timur yang berbatasan dengan danau di sekitar titik S7 dan titik S8, yang

bersesuaian persis dengan zona nitrat terendah. Gradasi warna dari barat ke timur pada kedua peta berlangsung dengan arah yang sama semakin ke arah timur mendekati danau, DO semakin rendah dan nitrat juga semakin rendah meskipun dengan mekanisme yang berbeda: penurunan DO di zona timur justru mendorong penurunan nitrat melalui denitrifikasi aktif, bukan menghambatnya. Satu-satunya ketidaksesuaian spasial antara kedua peta terjadi di lokasi titik S3, di mana nitrat tinggi namun DO rendah, yang sebagaimana telah dibahas sebelumnya merupakan anomali yang disebabkan oleh masukan nitrat eksternal yang masif dari limpasan pertanian sawah dan rembesan septik tank di sekitar lokasi tersebut. Secara keseluruhan, overlay visual antara peta sebaran nitrat dan peta sebaran DO memberikan gambaran yang paling jelas bahwa kondisi oksigenasi akuifer yang dicerminkan oleh nilai DO merupakan faktor spasial pengendali utama distribusi nitrat, di mana wilayah dengan DO tinggi di bagian barat cenderung menjadi zona akumulasi nitrat, sementara wilayah dengan DO rendah di bagian timur dekat danau menjadi zona penghancuran nitrat melalui proses denitrifikasi yang intensif.

Dari perbandingan keempat peta sebaran parameter terhadap peta sebaran nitrat, dapat disimpulkan secara hierarkis bahwa DO memiliki korespondensi spasial terkuat dengan nitrat, diikuti oleh pH yang menunjukkan pola terbalik yang sangat jelas, sementara TDS justru menunjukkan pola berlawanan yang membuktikan ketidakrelvanannya sebagai indikator nitrat, dan suhu tidak menunjukkan korespondensi spasial yang bermakna karena variasi spasialnya yang sangat kecil. Keempat pola spasial ini bersama-sama membentuk gambaran yang komprehensif bahwa distribusi nitrat di air tanah dataran rendah sekitar Rawa Pening dikendalikan secara dominan oleh kondisi biogeokimia akuifer khususnya DO dan pH yang bersama-sama menentukan intensitas proses denitrifikasi dengan penggunaan lahan di permukaan berperan sebagai penyedia sumber masukan nitrogen yang kemudian nasibnya ditentukan oleh kondisi redoks akuifer di masing-masing zona.



Gambar 4.17 Grafik *Predicted* (a) Nitrat, (b) Suhu, (c) pH, (d) TDS, (e) DO

Grafik *Predicted* Nitrat pada Gambar 4.17(a) menunjukkan nilai R^2 sebesar 0,2081, yang berarti model interpolasi hanya mampu menjelaskan sekitar 20,81% variasi nilai nitrat aktual di lapangan. Garis regresi yang terbentuk memiliki slope negatif dengan y = −1,077x + 6,5685 menunjukkan bahwa nilai prediksi model dan nilai aktual tidak bergerak searah ketika model memprediksi nilai nitrat yang lebih tinggi, nilai aktual justru cenderung lebih rendah, dan sebaliknya. Sebaran titik-titik

data yang jauh dari garis regresi dan tidak membentuk pola linear yang jelas mengindikasikan bahwa akurasi model interpolasi untuk nitrat tergolong rendah. Rendahnya akurasi ini dapat dijelaskan oleh sifat distribusi nitrat yang sangat heterogen dan dipengaruhi oleh faktor-faktor lokal yang bervariasi secara tajam antar titik seperti jenis penggunaan lahan, kedalaman sumur, dan kondisi redoks akuifer yang tidak dapat ditangkap secara memadai oleh model interpolasi spasial dengan hanya delapan titik sampel. Variasi nitrat yang sangat besar dengan rentang 0,483–8,285 mg/L dengan pola yang tidak mengikuti gradasi spasial yang halus menjadikan model interpolasi kesulitan menghasilkan prediksi yang akurat, sehingga peta sebaran nitrat yang dihasilkan perlu diinterpretasikan dengan hati-hati sebagai gambaran umum pola spasial, bukan nilai yang presisi di setiap piksel.

Grafik *Predicted* Suhu pada Gambar 4.17(b) menunjukkan nilai R^2 yang hampir nol yakni 0,00003 yang secara praktis berarti model interpolasi tidak memiliki kemampuan prediktif sama sekali terhadap distribusi suhu aktual di lapangan. Kemiringan garis regresi yang mendekati nol dengan $y = -0{,}013x + 27{,}731$ mengkonfirmasi bahwa nilai prediksi model tidak memiliki hubungan linear yang bermakna dengan nilai terukur. Hal ini sepenuhnya konsisten dengan karakteristik data suhu yang telah dibahas sebelumnya rentang variasi suhu 26,77–28,35°C di antara seluruh titik sampling menjadikan tidak ada gradasi spasial yang berarti untuk dimodelkan. Ketika variasi data mendekati nol, model interpolasi apapun tidak dapat menghasilkan prediksi yang bermakna karena pada dasarnya tidak ada pola spasial yang perlu diprediksi. Nilai R^2 yang mendekati nol ini bukan berarti model gagal, melainkan mencerminkan bahwa distribusi suhu di wilayah studi bersifat hampir homogen secara spasial, sehingga peta sebaran suhu yang dihasilkan lebih menggambarkan artefak interpolasi daripada variasi kondisi nyata di lapangan. Temuan ini mempertegas bahwa suhu bukan parameter yang membentuk pola spasial yang bermakna di wilayah studi.

Grafik *Predicted* pH pada Gambar 4.17(c) menunjukkan nilai R^2 sebesar 0,342 yang berarti model interpolasi mampu menjelaskan sekitar 34,2% variasi nilai pH aktual. Slope positif garis regresi ($y = 1{,}1248x - 1{,}0092$) mengindikasikan bahwa model dan nilai aktual bergerak ke arah yang sama ketika model memprediksi pH lebih tinggi, nilai aktual juga cenderung lebih tinggi yang

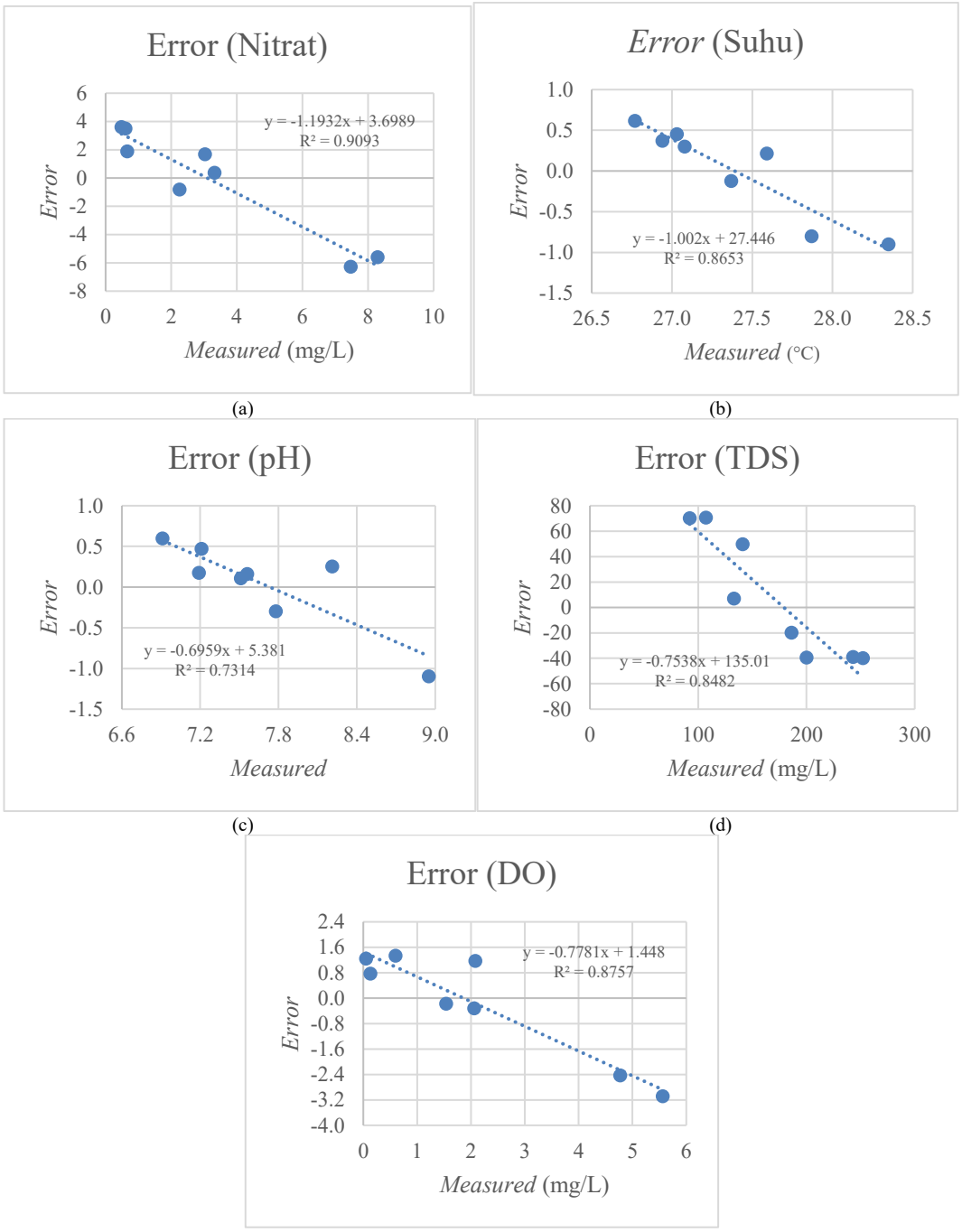
merupakan kondisi yang lebih baik dibandingkan grafik nitrat. Sebaran titik data yang lebih mengelompok di sekitar garis regresi dibandingkan grafik nitrat menunjukkan bahwa distribusi pH memiliki gradasi spasial yang lebih teratur dan lebih dapat diprediksi oleh model interpolasi. Hal ini sesuai dengan karakteristik pH sebagai parameter yang perubahannya di alam cenderung lebih gradual dan dipengaruhi oleh faktor geologi dan hidrogeologi yang bersifat spasial kontinu, berbeda dengan nitrat yang sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor lokal yang diskret. Meskipun nilai $R^2 = 0{,}342$ masih tergolong sedang-lemah, model interpolasi pH menghasilkan gambaran pola spasial yang lebih dapat dipercaya dibandingkan nitrat, sehingga peta sebaran pH dapat digunakan sebagai referensi spasial yang lebih andal untuk mendukung interpretasi distribusi nitrat.

Grafik *Predicted* TDS pada Gambar 4.17(d) menunjukkan nilai R^2 tertinggi di antara seluruh parameter fisika-kimia yakni 0,3736, yang berarti model interpolasi mampu menjelaskan sekitar 37,36% variasi nilai TDS aktual. Kemiringan positif yang lebih curam dengan $y = 1{,}5171x - 98{,}799$ menunjukkan bahwa model cenderung meremehkan nilai TDS pada rentang prediksi rendah dan melebih-lebihkan pada rentang prediksi tinggi, namun arah hubungannya konsisten positif. Akurasi model TDS yang relatif lebih baik dibandingkan nitrat dan pH dapat dikaitkan dengan sifat TDS yang merupakan agregat dari semua ion terlarut, termasuk mineral-mineral yang distribusinya lebih dipengaruhi oleh gradien hidrogeologi dan kedekatan dengan badan air danau yang membentuk pola spasial yang lebih teratur dan kontinu. Kedekatan dengan danau sebagai sumber utama mineral terlarut menciptakan gradasi spasial TDS yang lebih halus dari timur ke barat, sehingga lebih mudah dimodelkan secara interpolasi. Namun demikian, nilai $R^2 = 0{,}3736$ yang masih berada di bawah 0,5 tetap mengindikasikan bahwa akurasi model TDS masih tergolong sedang, dan peta sebarannya perlu diinterpretasikan dengan mempertimbangkan keterbatasan jumlah titik sampel.

Grafik *Predicted* DO pada Gambar 4.17(d) menunjukkan nilai R^2 sebesar 0,3644, yang berarti model interpolasi mampu menjelaskan sekitar 36,44% variasi nilai DO aktual. Kemiringan positif yang cukup curam dengan $y = 1{,}6419x - 1{,}0434$ mengindikasikan bahwa model cenderung meremehkan nilai DO aktual pada rentang prediksi rendah namun memprediksi lebih baik pada rentang

menengah. Menariknya, terdapat dua titik yang terlihat signifikan satu titik dengan nilai aktual sangat tinggi yaitu 5,6 mg/L saat prediksi hanya 2,4 mg/L, dan satu titik dengan nilai aktual sangat rendah 0,05 mg/L saat prediksi 1,2 mg/L. Kedua nilai ini kemungkinan besar merupakan titik S1 dan S7 nilainya sangat ekstrem dibandingkan titik-titik lainnya, sehingga model interpolasi kesulitan merepresentasikan transisi yang sangat tajam ini dalam ruang kontinu. Meskipun demikian, nilai R^2 DO yang sebanding dengan TDS menunjukkan bahwa model interpolasi DO menghasilkan akurasi yang setara dengan TDS, dan peta sebaran DO yang dihasilkan cukup representatif untuk menggambarkan pola gradasi kondisi oksigenasi akuifer dari barat ke timur wilayah studi secara umum.

Rendahnya nilai R^2 pada seluruh parameter yang tidak ada satupun melebihi 0,4 mencerminkan keterbatasan utama model interpolasi yang digunakan, yaitu jumlah titik sampel yang hanya delapan titik. Dalam metode interpolasi spasial, semakin sedikit titik referensi yang tersedia, semakin rendah kemampuan model untuk menangkap variasi spasial yang kompleks. Penambahan jumlah titik sampling pada penelitian lanjutan akan secara signifikan meningkatkan akurasi model dan keandalan peta sebaran yang dihasilkan. Meskipun demikian, peta-peta sebaran yang dihasilkan tetap bernilai sebagai gambaran pola spasial umum distribusi parameter kualitas air tanah di wilayah sekitar Danau Rawa Pening, yang dapat menjadi dasar perencanaan pemantauan dan pengelolaan kualitas air tanah di masa mendatang.



Gambar 4.18 Grafik *Error* (a) Nitrat, (b) Suhu, (c) pH, (d) TDS, (e) DO

Untuk mengevaluasi kualitas dan karakteristik *error* model interpolasi spasial. Nilai *error* dihitung sebagai selisih antara nilai terukur aktual di lapangan dikurangi nilai yang diprediksi oleh model. Grafik ini menggambarkan bagaimana besar dan arah kesalahan model bervariasi terhadap nilai aktual yang terukur. Pada model interpolasi yang ideal, titik-titik *error* seharusnya tersebar secara acak di sekitar nilai nol tanpa membentuk pola sistematis. Apabila *error* membentuk pola

linear yang jelas seperti yang terlihat pada seluruh grafik ini. Hal tersebut mengindikasikan adanya bias sistematis dalam model, yang berarti model secara konsisten melakukan kesalahan dengan arah tertentu tergantung pada besaran nilai aktualnya.

Grafik *error* model parameter nitrat pada Gambar 4.18(a) menunjukkan nilai R^2 yang sangat tinggi yakni 0,9093, yang justru menjadi sinyal paling kuat tentang kelemahan model interpolasi untuk parameter ini. Pola *error* yang sangat linear dan kuat dengan $y=-1{,}1932x+3{,}6989$ yang menunjukkan kemiringan negatif yang besar menunjukkan bias sist/ ematis yang sangat signifikan pada titik-titik dengan nilai nitrat aktual rendah, model menghasilkan *error* positif besar, sedangkan pada titik-titik dengan nilai nitrat aktual tinggi, model menghasilkan *error* negatif besar yang berarti model *overestimate* secara signifikan untuk nilai tinggi. Pola ini dikenal sebagai regression-to-the-mean bias, di mana model interpolasi spasial cenderung meratakan ekstrem-ekstrem nilai sehingga prediksi tertarik ke nilai rata-rata global. Dengan hanya delapan titik sampel, model interpolasi tidak mampu merepresentasikan transisi tajam antara zona nitrat sangat tinggi yang ada pada titik S1 dengan nilai 8,285 mg/L dan zona nitrat sangat rendah pada titik S4 dengan nilai 0,483 mg/L dalam jarak spasial yang relatif dekat, sehingga menghasilkan *error* yang sangat besar dan sistematis. Implikasinya, peta sebaran nitrat yang dihasilkan meremehkan konsentrasi di zona puncak pada sekitar titik S1 dan titik S3 dan melebih-lebihkan konsentrasi di zona rendah yaitu sekitar titik S4, S5, S7, sehingga gradasi warna pada peta nitrat aktualnya jauh lebih kontras daripada yang tampak.

Grafik *error* model parameter suhu pada Gambar 4.18(b) menunjukkan nilai $R^2=0{,}8653$ dengan pola linear negatif yang kuat yaitu $y=-1{,}002x+27{,}446$. Meskipun nilai ini terlihat tinggi, interpretasinya perlu dikaitkan dengan konteks variasi data suhu yang sangat sempit. Kemiringan yang mendekati -1 dan intersep yang mendekati nilai rata-rata suhu menunjukkan bahwa model interpolasi pada dasarnya memprediksi nilai yang sangat dekat dengan rata-rata global untuk seluruh titik, tanpa mampu menangkap variasi lokal yang ada. Pada titik-titik dengan suhu aktual di bawah rata-rata, *error* bernilai positif, sedangkan pada titik-titik dengan suhu aktual di atas rata-rata, *error* bernilai negatif. Pola ini sepenuhnya konsisten

dengan nilai R^2 yang sangat rendah pada grafik *predicted vs measured* suhu model tidak dapat membedakan variasi spasial suhu karena variasi tersebut sangat kecil dan tidak membentuk gradasi spasial yang terstruktur. Grafik *error* dengan R^2 tinggi namun grafik *predicted vs measured* dengan R^2 hampir nol ini merupakan kombinasi yang mengkonfirmasi bahwa model suhu hanya belajar dari rata-rata data dan gagal menangkap heterogenitas spasial, berapapun kecilnya heterogenitas tersebut.

Grafik *error* model parameter pH pada Gambar 4.18(c) menunjukkan nilai R^2=0,7314 dengan slope negatif dengan y=−0,6959x+5,381, yang mengindikasikan adanya bias sistematis sedang pada model interpolasi pH. Pada titik-titik dengan pH aktual rendah, model menghasilkan *error* positif, artinya model memprediksi pH lebih rendah dari nilai aktual di zona ini model meremehkan keasaman di zona barat yang memang lebih asam. Sebaliknya, pada titik dengan pH aktual tinggi titik S7, model menghasilkan *error* negatif terbesar artinya model memprediksi pH jauh lebih tinggi dari nilai aktualnya model tidak mampu merepresentasikan lonjakan pH yang sangat tinggi di titik S7 yang terletak dekat danau. Nilai R^2 *error* yang sebesar 0,7314 menunjukkan bahwa bias ini cukup konsisten dan sistematis, namun tidak separah nitrat. Kemiringan yang lebih landai dibandingkan nitrat mengindikasikan bahwa tingkat *regression-to-the-mean bias* pada pH lebih moderat, sesuai dengan fakta bahwa variasi pH antar titik lebih terstruktur secara spasial dibandingkan nitrat sehingga model masih dapat menangkap sebagian gradasi tersebut.

Grafik *error* model parameter TDS pada Gambar 4.18(d) menunjukkan nilai R^2=0,8482 dengan slope negatif dengan y=−0,7538x+135,01, yang mengindikasikan bias sistematis yang cukup kuat pada model TDS. Besarnya nilai *error* yang terlihat pada grafik ini hingga ±70 mg/L mencerminkan variasi absolut TDS yang memang lebih besar dibandingkan parameter lain. Pada titik-titik dengan TDS aktual rendah, model menghasilkan *error* positif besar, yang berarti model secara signifikan memprediksi TDS terlalu rendah di zona ini kemungkinan di zona barat yang TDS-nya rendah namun berdekatan secara spasial dengan zona TDS tinggi di timur sehingga nilai prediksinya tertarik ke atas. Sebaliknya, pada titik-titik dengan TDS aktual tinggi, model menghasilkan *error* negatif besar yang

berarti model memprediksi TDS terlalu tinggi di zona dekat danau transisi menuju nilai TDS tertinggi di titik S7 dan titik S8 tidak dapat direpresentasikan secara sempurna. Meskipun bias sistematis pada TDS cukup besar secara absolut, pola gradasi dari barat ke timur masih dapat terrepresentasikan dengan cukup baik oleh model, yang konsisten dengan nilai $R^2 = 0{,}3736$ pada grafik *predicted vs measured* TDS yang merupakan tertinggi di antara seluruh parameter.

Grafik *error* model parameter DO pada Gambar 4.18(e) menunjukkan nilai $R^2 = 0{,}8757$ dengan kemiringan negatif yang signifikan yaitu $y=-0{,}7781x+1{,}448$, mengindikasikan bias sistematis yang kuat pada model DO. Pola yang terbentuk sangat jelas: pada titik-titik dengan DO aktual sangat rendah, model menghasilkan *error* positif besar, yang berarti model sangat memprediksi DO terlalu tinggi di zona anoksik model tidak mampu merepresentasikan kondisi hampir tanpa oksigen yang terjadi di titik S7 dan titik S8 karena nilai tersebut terlalu ekstrem dibandingkan titik-titik lain. Sebaliknya, pada titik dengan DO aktual tinggi, model menghasilkan *error* negatif besar, artinya model sangat meremehkan DO aktual di zona aerobik penuh model tidak dapat merepresentasikan lonjakan DO yang sangat tinggi di titik S1. Pola ini merupakan manifestasi paling jelas dari *regression-to-the-mean bias* pada DO, di mana distribusi DO yang sebagian besar titik memiliki DO rendah, sementara titik S1 jauh di atas rata-rata dengan 5,56 mg/L menyulitkan model interpolasi untuk menghasilkan prediksi yang akurat di kedua ekstrem tersebut. Implikasinya, peta sebaran DO yang dihasilkan kemungkinan meremehkan zona aerobik di sekitar T1 dan melebih-lebihkan kadar oksigen di zona anoksik dekat danau, namun gradasi umum dari barat ke timur tetap dapat direpresentasikan dengan cukup baik.

Secara keseluruhan, tingginya nilai R^2 pada seluruh grafik *error* dengan kemiringan negatif yang konsisten mengindikasikan bahwa seluruh model interpolasi mengalami bias sistematis berupa *regression-to-the-mean*, yaitu kecenderungan model untuk memprediksi nilai yang terlalu dekat dengan rata-rata global sehingga meremehkan nilai-nilai ekstrem tinggi maupun rendah. Fenomena ini merupakan konsekuensi langsung dari keterbatasan jumlah titik sampel yang tidak cukup untuk menangkap heterogenitas spasial yang kompleks dari seluruh parameter yang dianalisis. pH memiliki bias paling moderat sehingga peta

sebarannya paling dapat dipercaya di antara seluruh parameter, sementara nitrat memiliki bias paling parah yang mengkonfirmasi bahwa peta sebaran nitrat harus diinterpretasikan sebagai gambaran pola umum saja dan bukan sebagai representasi nilai kuantitatif yang presisi di setiap lokasi. Penambahan jumlah titik sampling pada penelitian lanjutan idealnya minimal 30–40 titik untuk wilayah studi dengan luas dan kompleksitas yang setara akan secara substansial mengurangi bias sistematis ini dan meningkatkan keandalan model interpolasi spasial untuk seluruh parameter yang dikaji (Li & Heap, 2014)

4.5 Rekomendasi Pengelolaan

Berdasarkan hasil pemetaan spasial dan analisis laboratorium, seluruh titik sampling air tanah di sekitar dataran rendah Rawa Pening saat ini masih memenuhi baku mutu yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023, yaitu di bawah 20 mg/L. Meskipun demikian, terdapat variasi spasial yang sangat kontras. Area barat dan selatan seperti titik S1 dengan nilai nitrat 8,285 mg/L dan titik S3 dengan 7,469 mg/L mencatat konsentrasi yang mendekati separuh dari ambang batas standar. Peningkatan ini dipicu oleh akumulasi antropogenik dari aktivitas pertanian lahan kering dan limpasan limbah domestik pada akuifer dangkal yang cenderung bersifat aerobik. Sebaliknya, area yang mendekati zona litoral Danau Rawa Pening seperti titik S7 dan titik S8 memiliki perlindungan hidrogeologis alami berupa kondisi anoksik yang memicu proses denitrifikasi intensif sehingga konsentrasi nitrat tetap rendah. Untuk menjaga keberlanjutan kualitas air tanah dan mencegah tren kenaikan nitrat melampaui baku mutu di masa mendatang, maka dirumuskan rekomendasi pengelolaan lingkungan.

4.5.1 Pengendalian Kontaminasi dari Sektor Pertanian

Aktivitas pertanian lahan kering di wilayah barat dan selatan diidentifikasi sebagai salah satu *non-point source* utama yang menyumbang tingginya konsentrasi nitrat pada titik titik S1 dan titik S3. Sebagai langkah mitigasi, penerapan *Best Management Practices* (BMPs) dalam pemupukan menjadi hal yang mendesak untuk dilakukan. Petani di kawasan terdampak perlu didorong untuk mengurangi penggunaan pupuk nitrogen kimia sintetis secara berlebihan, seperti urea, dan mulai beralih ke strategi pemupukan berimbang atau pemanfaatan pupuk organik lepas

lambat. Pendekatan ini terbukti efektif untuk meminimalkan sisa nitrogen bebas di zona perakaran yang sangat rentan mengalami proses *leaching* ke dalam akuifer dangkal saat terjadi infiltrasi air hujan (Mawaddah et al., 2016; Hutagalung et al., 2022). Selain itu, program rotasi tanaman dengan mengintegrasikan tanaman polong-polongan ke dalam siklus tanam secara berkala juga perlu digalakkan. Tanaman ini memiliki kemampuan alami untuk memfiksasi nitrogen bebas dari udara secara biologis, sehingga tidak hanya mampu memperbaiki struktur dan kesuburan tanah, tetapi juga efektif mengurangi ketergantungan petani terhadap input nitrogen sintetis di permukaan (Lukito et al., 2021).

4.5.2 Pengenlolaan Limbah Domestik dan Sanitasi Lingkungan

Pertumbuhan kawasan permukiman dan aktivitas semi-perkotaan di koridor Ambarawa turut berkontribusi terhadap pasokan kontaminan nitrat dari limbah cair domestik ke dalam sumur dangkal masyarakat. Tingginya kadar nitrat pada sumur dangkal dengan kedalaman berkisar 10–12 meter seperti pada titik S1 dan titik S3 memperlihatkan bahwa akuifer dangkal di wilayah ini sangat rentan terhadap infiltrasi limbah vertikal. Oleh karena itu, pemerintah daerah perlu memperketat pengawasan konstruksi *septic tank* milik warga agar dipastikan strukturnya benar-benar kedap air, serta menjaga jarak aman minimal 11 meter dari sumur gali guna mencegah risiko kontaminasi silang senyawa nitrogen maupun bakteri (Falah & Sejati, 2023; Plata et al., 2025). Lebih lanjut, pada area dengan kepadatan permukiman yang tinggi di transisi semi-perkotaan Ambarawa, disarankan adanya pembangunan Instalasi Pengolahan Air Limbah komunal. IPAL komunal ini sebaiknya dilengkapi dengan unit pengolahan biologi kombinasi anoksik-aerobik yang andal untuk menyisihkan kandungan amonia dan nitrat secara optimal sebelum air limbah tersebut merembes atau dialirkan ke media lingkungan.

4.5.3 Konservasi Zona Penyangga Litoral Rawa Pening

Kondisi anoksik alami yang ditemukan di dekat zona litoral danau sekitar titik S7 dan titik S8 terbukti berperan penting sebagai benteng hidrogeologis alami yang mereduksi nitrat menjadi gas nitrogen melalui jalur denitrifikasi oleh bakteri heterotrof. Karakteristik unik dari zona *discharge* ini harus dipertahankan secara ketat dari ancaman alih fungsi lahan. Kebijakan pelarangan konversi lahan basah

alami menjadi area terbangun atau kawasan pertanian intensif di tepi danau menjadi hal yang sangat krusial, karena hilangnya vegetasi dan pengeringan rawa akan menaikkan kadar DO tanah, merusak kondisi anoksik, dan secara otomatis menghentikan proses denitrifikasi alami tersebut (Purwiyanto & Fauziyah, 2016; Vita Hidayati et al., 2025). Di samping menjaga benteng alami, pengembangan jaringan pemantauan kualitas air tanah partisipatif juga perlu dilakukan mengingat area titik S1 dan titik S3 sudah menunjukkan tanda awal akumulasi nitrat yang signifikan. Pemantauan berkala secara spasial dan temporal oleh Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Semarang yang bekerja sama dengan akademisi dan komunitas lokal sangat diperlukan. Untuk penelitian atau program monitoring selanjutnya, disarankan untuk memperluas sebaran titik sampling hingga mencapai 20–30 titik guna meningkatkan akurasi interpolasi spasial serta keandalan model prediksi sebaran kontaminan di dataran rendah Rawa Pening.

BAB V
PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian pemetaan sebaran kandungan nitrat pada air tanah di sekitar dataran rendah Rawa Pening, Kabupaten Semarang, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1) Konsentrasi nitrat pada air tanah di delapan titik sampling di sekitar dataran rendah Rawa Pening berkisar antara 0,483 mg/L hingga 8,285 mg/L. Konsentrasi tertinggi ditemukan pada S1 yaitu 8,285 mg/L, sedangkan konsentrasi terendah ditemukan pada S4 yaitu 0,483 mg/L. Seluruh titik sampling masih berada di bawah ambang batas maksimum yang ditetapkan dalam Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 Tahun 2023 sebesar 20 mg/L.
2) Pola sebaran spasial konsentrasi nitrat menunjukkan gradasi yang jelas dari barat-selatan ke timur wilayah studi. Konsentrasi nitrat tertinggi terkonsentrasi di bagian barat dan selatan wilayah studi yang didominasi oleh penggunaan lahan pertanian lahan kering, kebun campuran, dan kawasan pasar serta permukiman berkembang, sementara konsentrasi terendah berada di bagian timur yang berbatasan langsung dengan badan Rawa Pening. Temuan paling signifikan dari analisis pola sebaran adalah bahwa jarak ke danau berbanding terbalik dengan konsentrasi nitrat, titik-titik yang paling dekat dengan danau titik S7 dan titik S8 justru memiliki konsentrasi nitrat paling rendah, sedangkan titik yang paling jauh dari danau S1 memiliki konsentrasi tertinggi.
3) Nilai koefisien determinasi R^2 pada hubungan parameter Nitrat dengan DO menjadi yang paling kuat yaitu 0,2096 dengan korelasi positif yang konsisten dimana DO tinggi pada titik S1 yaitu 5,56 mg/L memiliki nitrat tertinggi, sementara titik dengan DO hampir nol pada titik S7 yaitu 0,05 mg/L memiliki nitrat terendah. Nilai koefisien determinasi R^2 pada hubungan parameter Nitrat dengan pH yaitu 0,1597 menunjukkan hubungan negatif dengan konsentrasi nitrat. TDS menunjukkan tidak terdapat hubungan yang signifikan dengan konsentrasi nitrat dengan R^2 yaitu 0,0847. Suhu menunjukkan tidak terdapat hubungan yang signifikan dengan konsentrasi nitrat dengan R^2 yaitu 0,068.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan keterbatasan yang ditemukan, berikut beberapa saran yang dapat diajukan sebagai berikut.

1) Jumlah titik sampling sebanyak delapan titik terbukti menghasilkan model interpolasi spasial dengan bias sistematis yang cukup signifikan, sebagaimana ditunjukkan oleh tingginya nilai R^2 pada grafik *error* untuk seluruh parameter. Penelitian lanjutan disarankan untuk menambah jumlah titik sampling minimal 20–30 titik yang tersebar merata di seluruh wilayah studi, termasuk di sisi timur danau dan di zona perbatasan antar kecamatan, guna meningkatkan akurasi dan keandalan model interpolasi spasial yang dihasilkan. Selain itu, pengambilan sampel sebaiknya dilakukan pada dua musim yang berbeda seperti musim hujan dan musim kemarau untuk menangkap variasi temporal konsentrasi nitrat yang mungkin terjadi akibat pengaruh curah hujan terhadap laju infiltrasi dan pengenceran kontaminan.
2) Upaya pengendalian pencemaran nitrat perlu diprioritaskan di zona barat dan selatan wilayah studi khususnya di sekitar kawasan titik S1 dan titik S3 yang menunjukkan konsentrasi nitrat tertinggi dan berpotensi terus meningkat. Pengendalian tersebut mencakup edukasi dan pendampingan kepada petani di wilayah pertanian lahan kering sekitar S1 mengenai penggunaan pupuk nitrogen yang efisien dan terukur sesuai kebutuhan tanaman, serta mendorong penerapan praktik pertanian baik yang meminimalkan kehilangan nitrogen melalui *leaching*. Perbaikan sistem sanitasi permukiman, khususnya melalui pembangunan septik tank yang kedap dan memenuhi standar teknis, juga perlu dilakukan terutama di kawasan permukiman padat di sekitar titik S5 dan titik S6 untuk mengurangi rembesan limbah domestik yang menjadi sumber masukan nitrogen ke air tanah.
3) Pemerintah Kabupaten Semarang disarankan untuk melakukan pemantauan berkala terhadap kualitas air tanah di wilayah sekitar Rawa Pening, minimal satu kali per tahun, khususnya pada titik-titik yang telah menunjukkan konsentrasi nitrat mendekati ambang batas seperti titik S1 dan titik S3. Pemantauan ini penting untuk mendeteksi tren peningkatan konsentrasi nitrat secara dini sebelum melampaui baku mutu yang berlaku. Selain itu, perlu

dipertimbangkan penerapan zona perlindungan air tanah di sekitar kawasan litoral danau yang terbukti secara alami memiliki kemampuan denitrifikasi tinggi, dengan membatasi alih fungsi lahan dan intensifikasi pertanian di zona tersebut guna mempertahankan fungsi ekologis lahan basah danau sebagai pelindung kualitas air tanah secara alami.

DAFTAR PUSTAKA

Abas, M., Ramli, M. F., Aris, A. Z., & Sulaiman, W. N. A. (2021). Hydrogeochemical processes and groundwater quality assessment in a shallow aquifer system nearby a tropical lake. *Environmental Science and Pollution Research*, 28(14), 17532-17548. https://doi.org/10.1007/s11356-020-11910-1

Aksiana. 2026. *Personal Publication Interview*

Amalia, A. V., Fariz, T. R., Atunnisa, R., Jabbar, A., Haris, A., Rahmawati, D., Sultan, H., Akmal, M. R., Siregar, Z. G. T., & Arifah, E. Z. (2023). Kondisi Lingkungan Danau Rawa Pening. *Bookchapter Alam Universitas Negeri Semarang*, *3*, 123–148. Https://Doi.Org/10.15294/Ka.V1i3.152

Aminuddin, Madiutomo, N., Zulfahmi, Cahyadi, T. A., Firmansyah, I., Maria, R., Nurohman, H., & Siswanto, N. D. (2025). Groundwater Quality And Health Risk Assessment In Trenggalek Karst Springs And Underground Rivers As A Drinking Water Source. *Geosciences*, *15*(10), 381. https://doi.org/10.3390/geosciences15100381

Anselin, L. (2020). *Spatial Data Analysis: Models and Methods*. Academic Press.

Appelo, C. A. J., & Postma, D. (2015). *Geochemistry, Groundwater and Pollution* (2nd ed.). CRC Press.

Asih, T. M., Helmi, M., Si, S., Si, M., & Sasmito, B. (2012). Pemodelan Spasial Aliran Permukaan Menggunakan Data Satelit Terra Aster-Gdem Di Daerah Tangkapan Hujan Waduk Rawa Pening Provinsi Jawa Tengah. *Jurnal Geodesi Undip*, *1*.

Benam-Beltoungou, E. Y. T., Bassene, I., Emvoutou, H. C., Akpataku, K. V., Diongue, D. M. L., & Faye, S. (2025). Groundwater Quality Assessed Using Water Quality Indices And Geostatistical Methods In The Thiaroye Aquifer, Senegal. *Water Science*, *39*(1), 151–170. Https://Doi.Org/10.1080/23570008.2025.2466275

Bouselsal, B., Satouh, A., Egbueri, J. C., Hashim, M. A., Arafat, A. A., Paramasivam, P., Alzaed, A., & Hussein, E. E. (2025). Groundwater For Drinking And Sustainable Agriculture And Public Health Hazards Of Nitrate: Developmental And Sustainability Implications For An Arid Aquifer System. *Results In Engineering*, *25*. Https://Doi.Org/10.1016/J.Rineng.2025.104160

Bramana, A., Setiawan, B., & Putranto, T. T. (2019). Karakteristik Hidrogeologi dan Fluktuasi Air Tanah di Kawasan Dataran Rendah Rawa Pening. *Jurnal Jasa Lingkungan*, 3(2), 112–125.

Brady, N. C., & Weil, R. R. (2017). *The Nature and Properties of Soils* (15th ed.). Pearson.

Burrough, P. A., McDonnell, R. A., & Lloyd, C. D. (2015). *Principles of Geographical Information Systems* (3rd ed.). Oxford University Press.

Canter, L. W. (2020). *Nitrates in Groundwater*. CRC Press.

Chang, K. T. (2019). *Introduction to Geographic Information Systems* (9th ed.). McGraw-Hill.

Daims, H., & Wagner, M. (2022). Kinetics and temperature dependence of nitrifying bacteria in aquatic and terrestrial ecosystems. *The ISME Journal*, 16(4), 915-927. https://doi.org/10.1038/s41396-021-01134-w

Das, A. (2025). Water Quality Assessment And Geospatial Techniques For The Delineation Of Surface Water Potential Zones: A Data-Driven Approach Using Machine Learning Models. *Desalination And Water Treatment*, *324*. Https://Doi.Org/10.1016/J.Dwt.2025.101461

Duan, M., Zhang, Y., & Liu, J. (2023). pH-dependent kinetics of nitrification processes and microbial community dynamics in shallow groundwater. *Water Research*, 241, 120152. https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120152

Falah, M. A., & Sejati, A. W. (2023). Distribusi Spasial Nitrat Air Tanah di Kecamatan Nanggulan, Kulon Progo. *Jurnal Geografi dan Edukasi*, 11(2), 114-125.

Fetter, C. W. (2018). *Applied Hydrogeology* (4th ed.). Waveland Press.

Freeze, R. A., & Cherry, J. A. (2019). *Groundwater* (Reissue Edition). Waveland Press.

Green, C. T., Puckett, L. J., Böhlke, J. K., Bekins, B. A., Phillips, S. P., Kauffman, L. J., ... & Orlando, J. L. (2008). Limited role of denitrification in controlling nitrate contamination in shallow groundwater systems in diverse agricultural environments. *Journal of Environmental Quality*, 37(2), 296–309. https://doi.org/10.2134/jeq2006.0561

Hutagalung, R., Siregar, S. H., & Apriani, I. (2022). Kontaminasi nitrat pada air tanah dangkal di sekitar kawasan pertanian intensif. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 28(1), 45-56.

Hem, J. D. (2015). *Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water* (3rd ed.). U.S. Geological Survey Water-Supply Paper.

Ida Sunaryo Purwiyanto, A., & Fauziyah, Dan. (2016). *Hubungan Nitrat, Fosfat Dan Ammonium Terhadap Keberadaan Makrozoobentos Di Perairan Muara Sungai Lumpur Kabupaten Ogan Komering Ilir Sumatera Selatan Relationship Of Nitrate , Phosphate , And Ammonium To The Existence Of Macrozoobenthos In Lumpur Estuary, Ogan Komering Ilir Regency, South Sumatra* (Vol. 8, Issue 2).

Isaaks, E. H., & Srivastava, R. M. (2019). *An Introduction to Applied Geostatistics*. Oxford University Press.

Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. (2023). *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan*. Jakarta: Kemenkes RI.

Kusuma, W. (2021). *Hidrogeologi Lingkungan: Teori dan Aplikasi Zona Satuan Geomorfologi*. Gadjah Mada University Press.

Li, J., & Heap, A. D. (2014). Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software*, 53, 173-189. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2023.119782

Lukito, H., Yogafanny, E., Uyun Azizah, S., Fadia Utama, V., Devi Safitri, N., Lingkungan, T., Teknologi Mineral, F., Jl Swk Lingkar Timur No, Y., & Istimewa Yogyakarta, D. (2021). *Investigation Of Nitrate Groundwater Quality In Sidoarum Village, Godean District, Sleman Regency, Special Region Of Yogyakarta* (Vol. 5, Issue 1).

Mamun, A. (2025). Elemental Associations With Groundwater Nitrate In Northeastern Region Of Saudi Arabia: Implications For Sustainable Water Management. *Limnological Review*, *25*(2). Https://Doi.Org/10.3390/Limnolrev25020012

Marshall, T. A., Evans, R. J., & Zhou, Y. (2025). *Integrating Artificial Intelligence and Machine Learning into Hydrological Modeling for Sustainable Water Resource Management. Environmental Modelling & Software*, 174, 105-118. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2024.105992

Mawaddah, S., Setyawan, A., & Nugraha, W. D. (2016). Pengaruh penggunaan pupuk nitrogen terhadap pencucian nitrat pada akuifer dangkal. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 14(2), 89-97.

Metcalf & Eddy, Inc. (2014). *Wastewater Engineering: Treatment and Resource Recovery* (5th ed.). McGraw-Hill.

Novotny, V. (2013). *Water Quality: Diffuse Pollution and Watershed Management*. John Wiley & Sons.

Plata, I., Humez, P., Wilson, L., Nightingale, M., Mcclain, C., & Mayer, B. (2025). Distribution, Sources, And Fate Of Nitrate In Groundwater In Agricultural Areas Of Southern Alberta, Canada. *Biogeochemistry*, *168*(1). Https://Doi.Org/10.1007/S10533-025-01209-8

Prasetyo, R. A. (2022). *Pemetaan kadar nitrat (NO3) pada air permukaan Danau Rawa Pening Kabupaten Semarang* [Tugas Akhir, Universitas Islam Indonesia]. Repository Universitas Islam Indonesia.

Pujiindiyati, E. R. (2018). Kerentanan Sistem Air Tanah Terhadap Kontaminasi Dan Aplikasi Isotop Alam Nitrogen-15 Dan Sulfur-34. *Ilmu Budaya*.

Purwiyanto, A. I. S., & Fauziyah, F. (2016). Studi sebaran nutrien dan proses transformasi nitrogen di lingkungan perairan lahan basah. *Jurnal Kelautan Nasional*, 11(1), 33-42.

Sprent, J. I. (2019). *The Ecology of the Nitrogen Cycle*. Cambridge University Press.

Sutrisno, T. (2021). Karakteristik Kimia Air Tanah Dangkal dan Hubungannya dengan Beban Pencemaran Nitrat di Kawasan Pertanian. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 27(2), 143-155.

Sutrisno, T. (2022). Dampak Alih Fungsi Lahan Pertanian Terhadap Beban Pencemaran Non-Point Source di Sub-DAS Rawa Pening. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 28(1), 45–58.

Todd, D. K., & Mays, L. W. (2020). *Groundwater Hydrology* (3rd ed.). John Wiley & Sons.

Vita Hidayati, N., Arviani, I. A., Rani Samudra, S., Agus Salim, Dewi Wisudyanti Budi Hastuti, Nabela Fikriyya, Abdul Malik Firdaus, Tri Susanti, Ghofar Ismail Putra, & El Mountassir El Mouchtari. (2025). Spatio - Temporal Distribution Of Nitrate And

Phosphate In Serayu Watershed, Central Java, Indonesia. *Jurnal Ilmiah Perikanan Dan Kelautan*. Https://Doi.Org/10.20473/Jipk.V17i3.72871

Vrba, J., & Zaporozec, A. (2015). *Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability*. IAH International Contributions to Hydrogeology. Heise.

Wang, J., & Chu, L. (2021). Factors affecting denitrifaction in groundwater remediation: A review of pH, temperature, and carbon source limits. *Water Research*, 196, 117011. https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117011

Wijaya, A. K., Setiawan, B., & Utami, S. R. (2023). Identifikasi Proses Hidrogeokimia dan Kontaminasi Nitrat pada Akuifer Bebas di Dataran Aluvial. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 21(3), 512-524. https://doi.org/10.14710/jil.21.3.512-524

World Health Organization. (2022). *Guidelines for Drinking-water Quality: Fourth Edition Incorporating the First and Second Addenda*. 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). In *Jurnal Ilmiah Kajian Antropologi* (Vol. 6, Issue 1)

LAMPIRAN

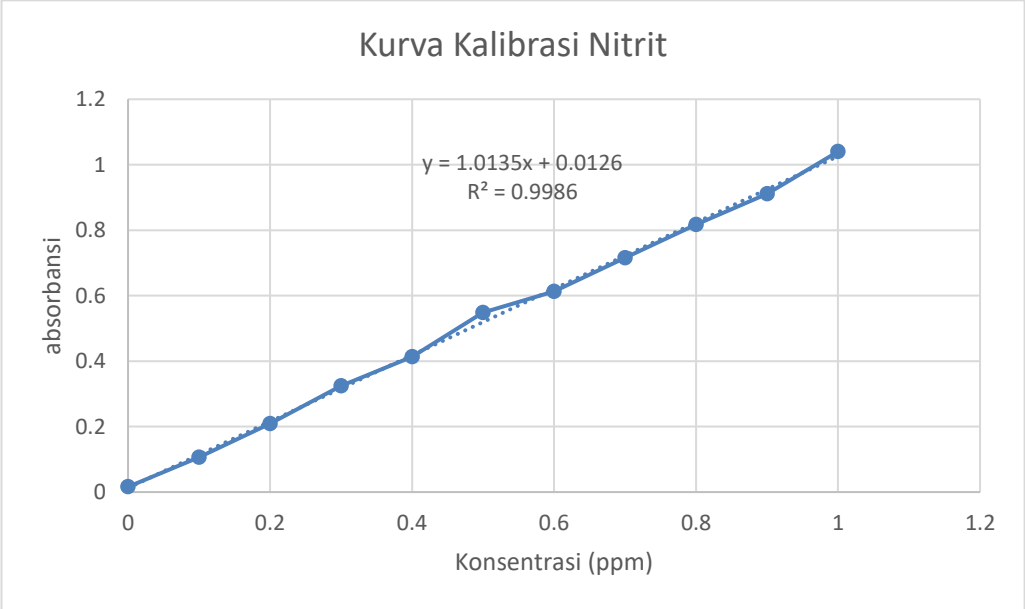
Lampiran 1. Data Hasil Sampling

No	Kode	Tgl Pengambilan	Waktu Pengambilan	Kedalaman sumur (m)	Jenis Lokasi	Lat	Long	Sample ID	Pengenceran (kali)	Abs	Average Abs	Conc (mg/L)	Avg Conc Nitrat (mg/L)	Baku Mutu (mg/L)	RPD (%)
1	S1	8/4/2026	13.59 WIB	15	Pasar Jambu	-7.275095	110.373361	1	20	0.157	0.162	8.010	8.285	20	6.17
								1D	20	0.167		8.560			
2	S2	8/4/2026	14.31 WIB	20	Rumah Warga	-7.292561	110.372507	2	10	0.123	0.122	3.070	3.029	20	2.47
								2D	10	0.120		2.988			
3	S3	8/4/2026	10.35 WIB	12	Sekolah	-7.297729	110.401694	3	10	0.284	0.283	7.497	7.469	20	0.71
								3D	10	0.282		7.442			
4	S4	8/4/2026	09.46 WIB	38	Rumah Warga	-7.288953	110.409240	4	1	0.191	0.187	0.494	0.483	20	4.28
								4D	1	0.183		0.472			
5	S5	8/4/2026	11.26 WIB	20	Kantor desa	-7.287053	110.395076	5	1	0.224	0.233	0.585	0.608	20	7.31
								5D	1	0.241		0.631			
6	S6	8/4/2026	13.39 WIB	20	Mushola	-7.264163	110.388241	6	10	0.129	0.132	3.235	3.318	20	4.55
								6D	10	0.135		3.400			
7	S7	7/4/2026	16.15 WIB	40	Mushola	-7.267536	110.411058	7	1	0.272	0.252	0.717	0.662	20	15.87
								7D	1	0.232		0.607			
8	S8	8/4/2026	16.15 WIB	30	Masjid	-7.260660	110.418822	8	10	0.091	0.093	2.191	2.246	20	4.30
								8D	10	0.095		2.301			

Lampiran 2. Kurva Kalibrasi Nitrit

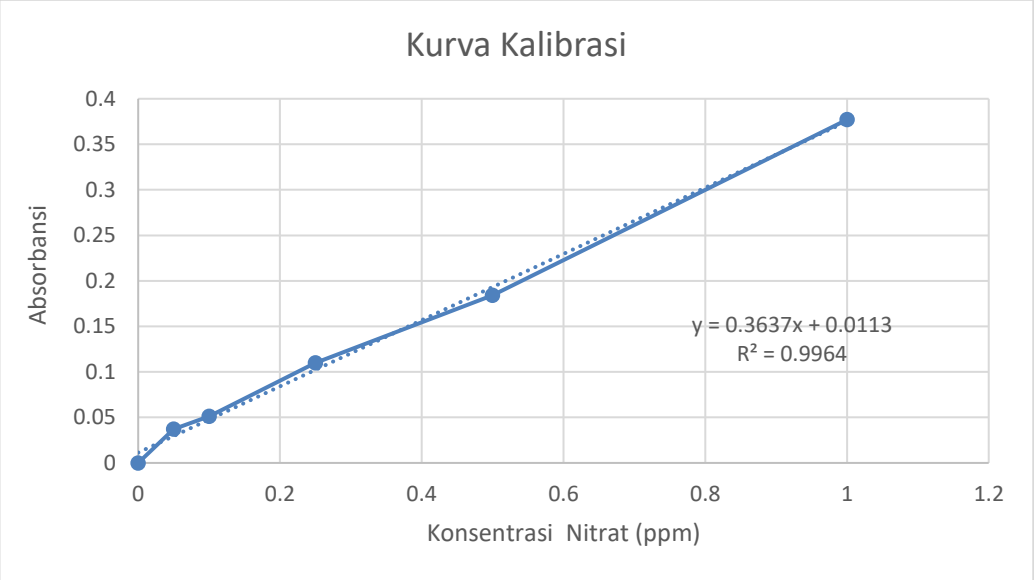
Kurva Kalibrasi Nitrit	
C (ppm)	**Abs**
0	0.016
0.1	0.106
0.2	0.209
0.3	0.324
0.4	0.413
0.5	0.548
0.6	0.613
0.7	0.716
0.8	0.817
0.9	0.911
1	1.04
Intersept	**0.012636364**
Slope	**1.013454545**
Lod	**0.013052961**
Loq	**0.038639013**

Sampel	Abs	Conc (mg/L)
1	0.016	**0.003318981**



Lampiran 3. Kurva Kalibrasi Nitrat

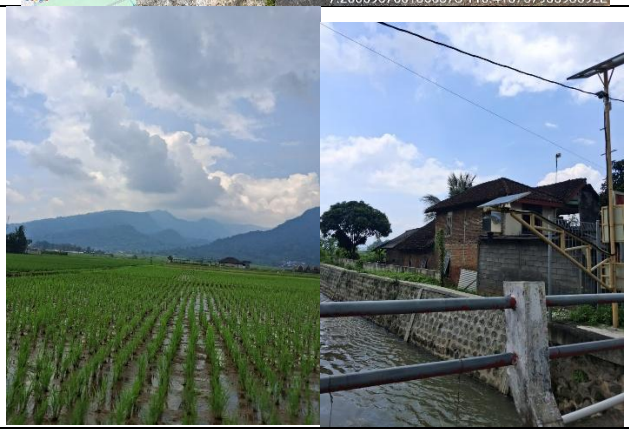
Conc (ppm)	Abs
0	0
0.05	0.037
0.1	0.051
0.25	0.11
0.5	0.184
1	0.377
Intersept	**0.011317972**
Slope	**0.363732719**
Lod	**0.00926582**
Loq	**0.076422762**



Lampiran 4. Dokumentasi Kegiatan Pengambilan Sampel

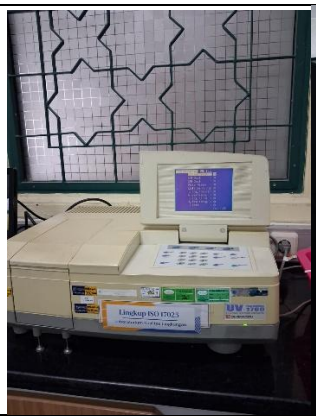
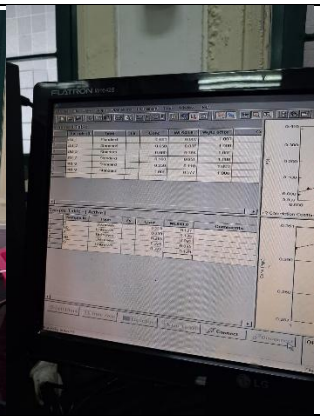
No	Gambar	Keterangan
1		Pengambilan dan pengujian contoh uji parameter insitu di titik S1
		Pengambilan dan pengujian contoh uji parameter insitu di titik S2
		Pengambilan dan pengujian contoh uji parameter insitu di titik S3

	 	Pengambilan dan pengujian contoh uji parameter insitu di titik S4
		Pengambilan dan pengujian contoh uji parameter insitu di titik S5
		Pengambilan dan pengujian contoh uji parameter insitu di titik S6

			Pengambilan dan pengujian contoh uji parameter insitu di titik S7
			Pengambilan dan pengujian contoh uji parameter insitu di titik S8
			Kondisi eksisting beberapa titik sampling

Lampiran 5. Dokumentasi Kegiatan Pengujian Laboratorium

No	Gambar	Keterangan
1		Persiapan sampel untuk pengujian Nitrat
		Pengujian parameter Nitrit
		Beberapa sampel siap dibaca menggunakan Spektrofotometer UV-Visible

	 	Pembacaan sampel Nitrat menggunakan Spektrofotometer UV-Visible

RIWAYAT HIDUP



Dininur Aprilliani lahir di Cilacap pada tanggal 7 April 2002. Penulis merupakan anak pertama dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Rasid Gunawan dan Ibu Dumyati. Penulis menempuh pendidikan dasar di SD Negeri Griba 14 Kota Bandung pada tahun 2009-2015, melanjutkan MTs Negeri 2 Kota Bandung pada tahun 2015-2018, kemudian melanjutkan jenjang SMA di SMA Negeri 24 Kota Bandung pada tahun 2018-2021, penulis selanjutnya menempuh pendidikan sebagai mahasiswa Teknik Lingkungan Universitas Islam Indonesia pada tahun 2022. Selama menempuh pendidikan penulis mengikuti berbagai kegiatan akademik maupun non akademik sebagai bagian dari pengembangan diri. Kegiatan yang dilakukan yaitu aktif mengikuti program kegiatan himpunan sebagai Ketua Tim Kerja Pengabdian Masyarakat dan Zero Waste FTSP selama satu periode, penulis juga aktif menjalani peran sebagai *Student Staff* Program Studi Teknik Lingkungan UII sebagai *Event Organizer* yang turut serta membantu mempersiapkan acara yang diaadakan oleh Program Studi, penulis aktif menjadi Asisten Praktikum Kimia Dasar, Asisten Praktikum Kimia Lingkungan, Asisten Parktikum Teknik Lingkungan I dan II, Asisten Praktikum Hidraulika, Asisten Dosen Mata Kuliah SPALD dan SPAM. Penulis juga mengikuti beberapa lomba seperti K2R NEO 2.0 yang diselenggarakan di ITB, mengikuti Program Kreativitas Mahasiswa (PKM). Adapun prestasi yang telah diraih selama mengikuti lomba yaitu penerima dana hibah penelitian PKM Tahun 2024, meraih Juara 3 Lomba *Research Poster*. Selain itu, penulis pernah mengikuti *Sakura Science Exchange Program* ke Jepang selama satu pekan pada bulan Desember Tahun 2025.