

TUGAS AKHIR

IDENTIFIKASI DAN ANALISIS KANDUNGAN LOGAM BERAT DI DALAM SEDIMEN DASAR PADA BAGIAN HULU SUNGAI DELI

*Diajukan untuk memenuhi tugas-tugas dan syarat-syarat untuk memperoleh
Gelar sarjana pada program studi Teknik Sipil fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun Oleh:

MIRANDA YASMIN

2207210009



UMSU
Unggul | Cerdas | Terpercaya

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA**

2026

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : MIRANDA YASMIN
NPM : 2207210009
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Identifikasi Dan Analisis Kandungan Logam Berat
Di Dalam Sedimen Dasar Pada Bagian Hulu Sungai Deli

DISETUJUI UNTUK DISAMPAIKAN KEPADA
PANITIA UJIAN SKRIPSI

Medan, 14 September 2026

Dosen Pembimbing

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Yunita Pane', with a stylized flourish at the end.

Yunita Pane, S.T., M.Si

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : MIRANDA YASMIN
NPM : 2207210009
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Skripsi : Identifikasi Dan Analisis Kandungan Logam Berat
Di Dalam Sedimen Dasar Pada Bagian Hulu Sungai Deli
Bidang Ilmu : Transportasi

Telah berhasil di pertahankan di hadapan Tim Penguji dan di terima sebagai salah satu syarat yang di perlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 14 September 2026

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Pembimbing



Yunita Pane, S.T., M.Si

Dosen Pembanding I / Penguji



Randi Gunawan, S.T., M.Si

Dosen Pembanding II / Penguji



Wiwin Nurzanah, S.T., M.T.

Ketua Program Studi Teknik Sipil



Josef Hadipramana, S.T., M.Sc., Ph.D.

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama Lengkap : MIRANDA YASMIN
NPM : 2207210009
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Sipil

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul: "Identifikasi Dan Analisis Kandungan Logam Berat Di Dalam Sedimen Dasar Pada Bagian Hulu Sungai Deli".

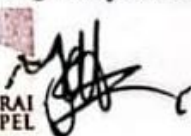
Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat dan ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 14 September 2026

Saya yang menyatakan


 **METERAI TEMPEL**
E-IAAOX183235783

MIRANDA YASMIN

2207210009

ABSTRAK

IDENTIFIKASI DAN ANALISIS KANDUNGAN LOGAM BERAT DI DALAM SEDIMEN DASAR PADA BAGIAN HULU SUNGAI DELI

Miranda Yasmin
2207210009
Yunita Pane, S.T., M.Si

Sedimen dasar sungai berperan sebagai reservoir bagi berbagai elemen kimia dan logam berat yang terbawa aliran air, sehingga karakteristik mineral penyusunnya penting dipahami sebagai dasar geokimia dalam menilai potensi keberadaan logam berat, terutama di bagian hulu sungai yang berkaitan erat dengan kondisi geologi sumber sedimen. Berdasarkan tinjauan pustaka mengenai mineralogi sedimen, klasifikasi mineral lempung dan oksida besi-mangan sebagai penjerap logam berat, serta kajian penelitian terdahulu, penelitian ini bertujuan mengidentifikasi karakteristik mineral sedimen dasar pada bagian hulu Sungai Deli dan menganalisis keterkaitannya terhadap potensi keberadaan unsur logam. Sampel sedimen diambil pada satu titik (Titik T2, kawasan Sembahé) menggunakan metode *purposive sampling*, kemudian dianalisis dengan metode *X-Ray Diffraction* (XRD) dan data difraksinya diolah menggunakan perangkat lunak Match! Phase Analysis berbasis basis data COD-Inorganic. Hasil analisis menunjukkan sedimen tersusun atas dua fase utama, yaitu kuarsa (SiO_2) sebesar 56,3% sebagai fase dominan dan satu fase hasil pencocokan yang memiliki kemiripan dengan senyawa $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ sebesar 43,7%. Dominasi kuarsa mengindikasikan sedimen didominasi mineral silikat yang stabil terhadap pelapukan dan transportasi fluvial, sedangkan identifikasi fase kedua masih bersifat tentatif karena $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ dilaporkan sebagai senyawa sintesis, sehingga hanya mengindikasikan kemungkinan keterkaitan dengan unsur Cu, Fe, dan Ge, bukan membuktikan keberadaannya dalam sedimen. Sebagai saran, penelitian lanjutan disarankan mencakup pengambilan sampel di beberapa titik dan penampang sungai, analisis kuantitatif unsur logam menggunakan AAS atau ICP-MS, analisis ukuran butir sedimen, serta verifikasi fase mineral kompleks melalui pendekatan *Rietveld refinement*; selain itu pemerintah daerah dan instansi terkait diharapkan menjadikan hasil ini sebagai data awal pemantauan dan pengelolaan kualitas sedimen Daerah Aliran Sungai Deli secara berkelanjutan.

Kata kunci: Sedimen, Sungai Deli, X-Ray Diffraction (XRD), Mineral, Unsur Logam.

ABSTRACT

IDENTIFICATION AND ANALYSIS OF HEAVY METAL CONTENT IN THE RIVERBED SEDIMENT OF THE UPPER DELI RIVER

Miranda Yasmin
2207210009
Yunita Pane, S.T., M.Si

Riverbed sediment acts as a reservoir for various chemical elements and heavy metals carried by water flow, making its mineral characteristics important to understand as a geochemical baseline for assessing the potential presence of heavy metals, particularly in upstream river reaches that are closely linked to the geological conditions of the sediment source. Drawing on the literature review of sediment mineralogy, the role of clay minerals and iron-manganese oxides in heavy metal adsorption, and relevant prior studies, this research aims to identify the mineral characteristics of riverbed sediment in the upper reach of the Deli River and to analyze their relationship with the potential presence of metal elements. A sediment sample was collected from Point T2 (Sembahe area) using purposive sampling and analyzed using X-Ray Diffraction (XRD), with diffraction data processed using Match! Phase Analysis software based on the COD-Inorganic database. The results show that the sediment consists of two main phases: quartz (SiO_2) as the dominant phase (56.3%) and a second matched phase showing similarity to $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ (43.7%). The dominance of quartz indicates that the sediment is mainly composed of stable silicate minerals resistant to weathering and fluvial transport, while identification of the second phase remains tentative, since $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ is reported as a synthetic compound and thus only indicates a possible association with Cu, Fe, and Ge elements rather than confirming their presence in the sediment. As recommendations, future research should include sediment sampling at multiple points and cross-sections along the river, quantitative elemental analysis using AAS or ICP-MS, sediment grain-size analysis, and verification of the complex mineral phase through Rietveld refinement; local government and relevant agencies are also expected to use these findings as baseline data for ongoing monitoring and management of sediment quality in the Deli River watershed.

Keywords: *Sediment, Deli River, X-Ray Diffraction (XRD), Mineral, Metal Elements.*

KATA PENGANTAR

Assalamu'Alaikum Warahmatullahi Wabarakatuh

Segala puji dan syukur saya ucapkan sebagai penulis kepada kehadiran Allah SWT yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu karunia tersebut adalah berhasilnya penulis dalam menyelesaikan laporan Tugas Akhir yang berjudul “IDENTIFIKASI DAN ANALISIS KANDUNGAN LOGAM BERAT DI DALAM SEDIMEN DASAR PADA BAGIAN HULU SUNGAI DELI”. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Penulis menyadari bahwa penyusunan Tugas Akhir ini tidak akan terselesaikan tanpa adanya bantuan, bimbingan, serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Yunita Pane, S.T., M.Si., selaku Dosen Pembimbing yang telah memberikan bimbingan, arahan, motivasi, dan dukungan selama penyusunan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Randi Gunawan, S.T., M.Si selaku Dosen Pembimbing 1 yang telah memberikan kritik, saran, dan masukan dalam penyempurnaan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Wiwin Nurzanah, S.T., MT., selaku Dosen Pembimbing 2 yang telah memberikan arahan, kritik, saran, dan masukan yang berharga selama proses penyusunan Tugas Akhir ini.
4. Bapak Josef Hadipramana, S.T., M.Sc., Ph.D., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil dan Ibu Rizki Efrida, S.T., M.T., selaku Sekretaris Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, yang telah memberikan arahan dan dukungan selama proses pendidikan hingga penyusunan Tugas Akhir ini.
5. Bapak Assoc. Prof. Ir. Ade Faisal, ST, MSc, Ph.D., selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah memberikan kesempatan dan fasilitas selama penulis menempuh pendidikan.

6. Seluruh Bapak/Ibu Dosen, Staf Administrasi, teman-teman mahasiswa Program Studi Teknik Sipil angkatan 2022, serta seluruh pihak yang telah membantu dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
7. Kedua orang tua tercinta dan seluruh keluarga besar yang senantiasa memberikan doa, kasih sayang, dukungan, dan motivasi selama proses penyelesaian Tugas Akhir ini.
8. Diri sendiri yang telah memilih untuk terus melangkah, belajar, dan menyelesaikan setiap proses hingga Tugas Akhir ini dapat terselesaikan.
9. Sahabat-sahabat SMA dalam lingkaran pertemanan STAFSUS, yaitu Rafi Abimanyu, Adinda Aisyah Gultom, Ghasani Fathonia, Wan Zahra Khumaira, Yusriyah Husna Siregar, Naufal Mahardika Fakhri, dan Salsabilah Adythias Putri, yang telah memberikan dukungan, kebersamaan, dan banyak kenangan berharga.
10. Teman-teman seperjuangan selama masa perkuliahan, yaitu Salsabila Hasibuan, Ratu Dilla Karera Ujung, Nur Syaripatuzzahro, dan Meilinda Wafa, yang telah memberikan kebersamaan, bantuan, dan dukungan hingga penyelesaian Tugas Akhir ini.
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu per satu yang telah membantu dan memberikan dukungan dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi penyempurnaan Tugas Akhir ini di masa yang akan datang.

Akhir kata, penulis berharap semoga Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi pembaca serta dapat menjadi referensi yang berguna dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya di bidang Teknik Sipil.

Medan, 14 September 2026



MIRANDA YASMIN

2207210009

DAFTAR ISI

LEMBAR PERSETUJUAN PEMBIMBING	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iv
ABSTRAK	v
ABSTRACT	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Ruang Lingkup Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Sungai dan Daerah Aliran Sungai (DAS)	5
2.2 Sedimen Dasar Sungai	6
2.3 Mineralogi Sedimen Dasar	7
2.4 Karakteristik Mineral Sedimen terhadap Akumulasi Logam Berat	8
2.4.1 Mineral Lempung terhadap Akumulasi Logam Berat	8
2.4.2 Mineral Oksida Besi dan Mangan dalam Akumulasi Logam Berat	10
2.4.3 Pengaruh Ukuran Butir Sedimen terhadap Akumulasi Logam Berat	11
2.5 Logam Berat dalam Sedimen Sungai	12
2.6 Metode X-Ray Diffraction (XRD)	14
2.7 Kajian Penelitian Terdahulu	15

2.8 Kerangka Pemikiran Penelitian	20
BAB 3 METODE PENELITIAN	22
3.1 Bagan Alir Penelitian	22
3.2 Lokasi Penelitian	24
3.3 Populasi dan Sampel	26
3.4 Data Penelitian	26
3.4.1 Jenis dan Sumber Data	26
3.4.2 Teknik Pengumpulan Data	27
3.5 Variabel Penelitian	27
3.6 Metode Analisis Data	27
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Hasil Analisis X-Ray Diffraction (XRD) Sedimen Dasar Sungai Deli	29
4.1.1 Pola Difraksi XRD Sedimen Dasar Sungai Deli	30
4.1.2 Komposisi Fase Mineral Sedimen Dasar Sungai Deli	35
4.2 Karakteristik Fase Mineral Sedimen Dasar Sungai Deli	37
4.2.1 Karakteristik Mineral Kuarsa (SiO_2)	37
4.2.2 Karakteristik Fase Hasil Identifikasi Kedua	38
4.3 Interpretasi Keberadaan Germanium (Ge) dalam Sedimen Sungai Deli	39
4.4 Keterkaitan Karakteristik Mineral Sedimen dengan Unsur Logam	40
4.5 Keterkaitan Karakteristik Sedimen dengan Morfologi Sungai	41
4.6 Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu	45
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	52
5.1 Kesimpulan	52
5.2 Saran	53
DAFTAR PUSTAKA	54
LAMPIRAN	58

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1: Skema Sistem Daerah Aliran Sungai (DAS)	5
Gambar 2.2: Skema Suplai, Transport, dan Pengendapan Sedimen Sungai	6
Gambar 2.3: Skema Geometri Pengukuran X-Ray Diffraction (XRD)	14
Gambar 3.1: Bagan alir penelitian	22
Gambar 3.2: Lokasi Pengambilan Sampel Sedimen Dasar Sungai Deli	24
Gambar 3.3: Titik Pengambilan Sampel Sedimen Hulu Sungai Deli	25
Gambar 4.1: Pola Difraksi XRD Sedimen Sungai Deli Titik T2	31
Gambar 4.2: Diagram Intensitas Relatif Difraksi Sedimen Sungai Del	34
Gambar 4.3: Diagram Persentase Fase Mineral Sedimen (Metode RIR)	36
Gambar 4.4: Kondisi Alur Sungai pada Lokasi Pengambilan Sampel	43
Gambar 4.5: Kondisi Dasar Sungai pada Lokasi Pengambilan Sampel	44
Gambar 4.6: Dokumentasi Sampel Sedimen Sungai Deli	44

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1: Penelitian Terdahulu Terkait Sedimen Sungai dan Logam Berat	18
Tabel 2.2: Lanjutan Penelitian Terdahulu	19
Tabel 4.1: Estimasi Komposisi Fase Mineral Sedimen Dasar Pada Titik T2	30
Tabel 4.2: Puncak Difraksi Utama XRD Sedimen Sungai Deli T2	32

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sungai adalah bagian penting dari ekosistem air yang memiliki fungsi yang signifikan dalam interaksi antara lingkungan dan manusia sebagai penyedia air, tempat tinggal makhluk hidup, dan jalur pengangkutan untuk materi alami maupun buatan. Endapan di dasar sungai menyimpan butiran padat yang berasal dari pelapukan batuan dan erosi di hulu serta bahan yang terbawa oleh arus air. Oleh karena itu, endapan dasar sering kali berperan sebagai *reservoir* atau *sink* bagi berbagai elemen kimia dan logam berat yang dibawa oleh aliran air, baik yang dihasilkan secara alami maupun dari aktivitas manusia.

Penelitian internasional mengindikasikan bahwa kadar logam berat dalam sedimen umumnya cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan kadar pada kolom air. Hal ini disebabkan oleh sifat logam berat yang memiliki ketertarikan terhadap partikel padat, sehingga mereka mudah terikat dan mengendap di dasar sedimen. Akibatnya, sedimen di bagian bawah sering menyimpan sejumlah besar logam yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan air Sungai (Sojka, 2022).

Logam berat yang umum ditemukan dalam endapan meliputi Besi (Fe), Mangan (Mn), Tembaga (Cu), Seng (Zn), Timbal (Pb), Kromium (Cr), serta elemen jejak lainnya seperti Kadmium (Cd) dan Merkuri (Hg) (Sojka, 2022). Ciri-ciri geologi di area hulu, terutama jenis batuan, jenis endapan, proses erosi, dan cara pengangkutan material, memiliki dampak signifikan terhadap kualitas serta komposisi sedimen dasar termasuk potensi adanya logam berat di dalamnya (Debnath dkk., 2021).

Selain aspek geologi, faktor-faktor fisik dan kimia lingkungan seperti pH, kandungan bahan, ukuran partikel sedimen, serta arus air juga memengaruhi perilaku logam berat, apakah mereka tetap terikat dalam sedimen, dilepaskan ke dalam air, atau terakumulasi dalam organisme dasar.

Penelitian mengenai sedimen di berbagai lokasi di dunia juga mengindikasikan bahwa sebaran logam berat memiliki sifat yang bergantung pada ruang dan waktu: ada perbedaan konsentrasi yang terpengaruh oleh (aliran sungai, kedekatan dengan sumber pencemaran, lokasi muara, dan lain-lain) serta oleh musim atau situasi hidrologi. Oleh karena itu, penting untuk menganalisis karakteristik mineral sedimen yang dapat mempengaruhi keberadaan logam berat di dasar sedimen suatu sungai, terutama di bagian hulu, guna mendapatkan dasar geokimia yang tepat (Bai dkk., 2024).

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengenali dan menganalisis karakteristik mineral penyusun sedimen dasar di bagian hulu Sungai Deli sebagai dasar dalam memahami potensi keberadaan logam berat. Analisis dilakukan melalui pendekatan mineralogi sedimen menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD), yang mengkaji keterkaitan antara jenis mineral penyusun sedimen dan potensi penumpukan logam berat berdasarkan tinjauan literatur. Metode ini diharapkan dapat memberikan gambaran awal atau baseline geokimia sedimen dasar Sungai Deli, sehingga hasil penelitian dapat bermanfaat bagi kajian teknik sipil, pengelolaan lingkungan, serta perencanaan sumber daya air yang berkelanjutan.

Dalam penelitian ini, istilah kandungan logam berat dipahami sebagai potensi keberadaan logam berat yang ditinjau berdasarkan karakteristik mineral penyusun sedimen dasar yang diidentifikasi menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD), bukan sebagai hasil pengukuran konsentrasi logam berat secara langsung.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, maka rumusan masalah dalam penelitian ini:

1. Bagaimana karakteristik mineral sedimen dasar pada bagian hulu Sungai Deli berdasarkan hasil analisis X-Ray Diffraction (XRD)?
2. Bagaimana keterkaitan karakteristik mineral sedimen terhadap potensi keberadaan logam berat di dalam sedimen dasar pada bagian hulu Sungai Deli?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dikemukakan, tujuan dari penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi karakteristik mineral sedimen dasar pada bagian hulu Sungai Deli berdasarkan hasil analisis X-Ray Diffraction (XRD).
2. Menganalisis keterkaitan karakteristik mineral sedimen terhadap potensi keberadaan logam berat di dalam sedimen dasar pada bagian hulu Sungai Deli.

1.4 Ruang Lingkup Penelitian

Untuk menjaga ketepatan ruang lingkup, penelitian ini dibatasi pada:

1. Lokasi penelitian dibatasi pada sedimen dasar bagian hulu Sungai Deli.
2. Sampel yang dianalisis berupa sedimen dasar sungai.
3. Analisis laboratorium difokuskan pada identifikasi karakteristik mineral sedimen menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD).
4. Penelitian ini tidak melakukan pengukuran konsentrasi logam berat secara langsung, melainkan menggunakan hasil analisis mineralogi sedimen sebagai pendekatan untuk menginterpretasikan potensi keberadaan logam berat.
5. Pembahasan logam berat dalam penelitian ini bersifat interpretatif dan didasarkan pada keterkaitan antara karakteristik mineral sedimen dan potensi akumulasi logam berat berdasarkan kajian pustaka.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. Memberikan data awal (baseline) mengenai karakteristik mineral sedimen dasar pada bagian hulu Sungai Deli yang berpotensi berasosiasi dengan logam berat.
2. Menjadi referensi ilmiah dalam bidang teknik sipil, khususnya pada kajian sedimentologi, lingkungan, dan pengelolaan sumber daya air.
3. Menjadi acuan awal dalam pemantauan kondisi sedimen dan lingkungan Sungai Deli pada penelitian selanjutnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan Tugas Akhir ini disusun untuk memberikan menyeluruh mengenai isi dan tahapan penelitian. Adapun sistematika penulisan proposal ini terdiri atas lima bab sebagai berikut:

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang penelitian, rumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, manfaat penelitian, serta sistematika penulisan.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini memuat kajian teori dan konsep yang berkaitan dengan sedimen dasar sungai, mineralogi sedimen, serta keterkaitan karakteristik mineral sedimen dengan potensi akumulasi logam berat, disertai dengan kajian penelitian terdahulu yang relevan.

BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan lokasi dan waktu penelitian, metode pengambilan sampel sedimen dasar sungai, preparasi dan analisis laboratorium menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD), serta metode analisis data yang digunakan untuk mengidentifikasi karakteristik mineral sedimen dan menginterpretasikan potensi keberadaan logam berat secara kualitatif.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menyajikan hasil analisis mineralogi sedimen dasar sungai berdasarkan metode X-Ray Diffraction (XRD) serta pembahasan mengenai karakteristik mineral sedimen dan keterkaitannya dengan potensi keberadaan logam berat berdasarkan kajian pustaka.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi kesimpulan yang diperoleh dari hasil penelitian serta saran yang dapat digunakan sebagai bahan pertimbangan untuk penelitian selanjutnya.

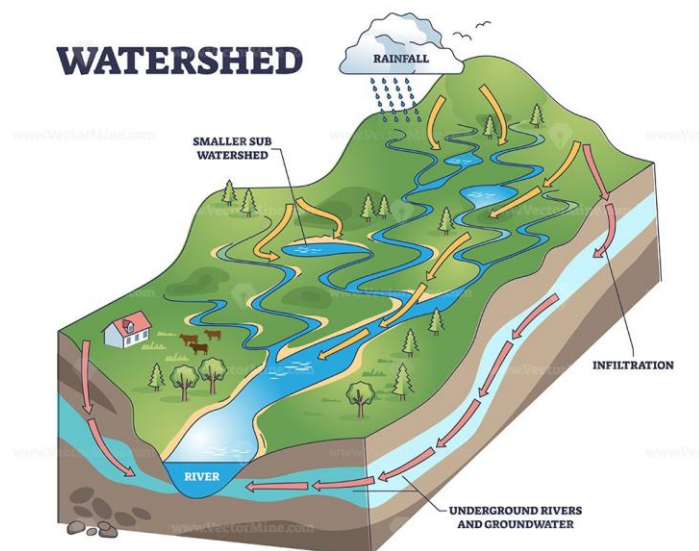
BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sungai dan Daerah Aliran Sungai (DAS)

Sungai adalah saluran alami yang berfungsi untuk mengalirkan air dari area hulu ke hilir dan memegang peranan penting dalam sistem hidrologi di daratan. Aliran sungai tidak hanya berisi air, tetapi juga membawa serta bahan-bahan yang terlarut dan tersuspensi, seperti endapan mineral yang berasal dari wilayah tangkapan air. Kegiatan ini membuat sungai menjadi sistem yang hidup, selalu mengalami perubahan fisik dan kimia sepanjang waktu (Sojka, 2022).

Daerah Aliran Sungai (DAS) merujuk pada area daratan yang secara topografi dikelilingi oleh punggung bukit, berfungsi sebagai tempat penampungan air hujan yang akan mengalir ke sungai utama. DAS mencakup sungai utama, anak sungai, serta semua elemen lingkungan yang mempengaruhi proses limpasan, infiltrasi, dan erosi. Ciri-ciri DAS seperti sudut kemiringan lereng, tipe tanah, dan cara penggunaan lahan sangat berpengaruh terhadap pengaliran sedimen ke dalam sistem sungai (Kim, 2020).



Gambar 2.1: Skema Sistem Daerah Aliran Sungai (DAS)

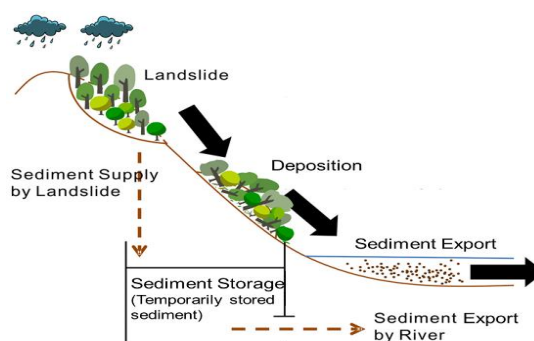
Sumber: Google Images (watershed diagram schematic)

Hubungan antara sungai dan DAS memiliki sifat saling berinteraksi, di mana perubahan pada kondisi DAS akan memberikan efek langsung pada sifat aliran dan sedimentasi sungai. Material sedimen yang berasal dari daerah hulu akan terbawa dan mengendap di sepanjang jalur sungai, terutama di bagian-bagian yang memiliki kecepatan aliran yang lebih rendah. Untuk itu, sedimen yang ada di dasar sungai dapat berperan sebagai penanda bagi kondisi lingkungan dan proses geologi yang berlangsung di area DAS (Y. Wang dkk., 2023).

2.2 Sedimen Dasar Sungai

Sedimen yang terdapat di sungai adalah material padat yang berasal dari pelapukan batuan dan tanah, yang dibawa oleh aliran air dan kemudian diletakkan di dasar sungai. Material ini terdiri dari partikel dengan berbagai ukuran, mulai dari lempung hingga pasir yang terbuat dari mineral yang tidak organik. Proses pembentukan dan pemindahan sedimen dipengaruhi oleh kondisi geologi, cuaca, serta tindakan manusia di daerah aliran Sungai (Sojka, 2022).

Sedimen yang terletak di dasar sungai bersifat dinamis dan dapat mengalami perubahan pada komposisinya seiring berjalannya waktu akibat ketidakstabilan debit dan tambahan material dari area hulu. Aktivitas pemindahan dan pengendapan sedimen mengakibatkan klasifikasi ukuran butir serta perubahan pada komposisi mineral sedimen. Oleh karena itu, sedimen yang ada di dasar sungai sering dimanfaatkan sebagai objek penelitian untuk memahami lingkungan perairan (Debnath dkk., 2021).



Gambar 2.2: Skema Suplai, Transport, dan Pengendapan Sedimen Sungai.

Sumber: (Teng dkk., 2020)

Selain itu, lapisan sedimen di dasar sungai mempunyai kemampuan untuk menahan elemen anorganik tertentu pada permukaan mineralnya. Karakteristik fisik dan kimia dari sedimen, seperti ukuran partikel dan jenis mineral yang membentuknya, memainkan peran penting dalam menentukan cara sedimen berinteraksi dengan elemen kimia di habitat air. Oleh karena itu, sedimen dasar sungai memiliki peranan yang signifikan dalam penelitian karakteristik lingkungan perairan (Debnath dkk., 2021)

2.3 Mineralogi Sedimen Dasar

Mineralogi sedimen adalah ilmu yang meneliti varian dan sifat mineral yang membentuk sedimen, hasil dari proses pelapukan, pengangkutan, dan pengendapan material geologi. Komposisi mineral dalam sedimen mencerminkan asal usul material serta keadaan lingkungan saat proses pembentukannya berlangsung. Pada umumnya, mineral sedimen terdiri dari mineral silikat, karbonat, dan oksida yang masing-masing memiliki karakteristik fisik dan kimia yang bervariasi (Sojka, 2022).

Mineral yang membentuk sedimen memainkan peran penting dalam mempengaruhi hubungan antara sedimen dan elemen kimia di dalam perairan. Beberapa mineral, contohnya mineral lempung dan oksida besi, memiliki area permukaan yang besar yang memungkinkan keterlibatan dengan unsur logam berat. Dengan demikian, susunan mineral dalam sedimen berpotensi untuk memengaruhi sifat kimia dari sedimen yang terdapat di dasar sungai (Chen dkk., 2016)

Pemahaman mengenai mineralogi sedimen menjadi dasar penting dalam kajian karakteristik sedimen dasar sungai. Informasi mengenai jenis dan susunan mineral dimanfaatkan untuk memahami proses-proses lingkungan yang berlangsung di daerah aliran sungai serta kemungkinan keberadaan logam berat yang terkait dengan mineral sedimen. Oleh karena itu, analisis mineralogi sedimen dianggap sebagai pendekatan yang relevan dalam penelitian lingkungan perairan (Chen dkk., 2016)

2.4 Karakteristik Mineral Sedimen terhadap Akumulasi Logam Berat

Karakteristik mineral yang menyusun sedimen dasar sungai berperan penting dalam proses akumulasi dan penyebaran logam berat di lingkungan perairan. Mineral dalam sedimen dapat bertindak sebagai media reaktif yang mampu mengikat logam berat melalui proses pengikatan logam berat permukaan dan pertukaran ion. Proses tersebut dipengaruhi oleh struktur kristal mineral, muatan pada permukaan partikel, serta luas permukaan sedimen (C. Zhang dkk., 2014).

Hasil penelitian mengungkapkan bahwa komponen utama dalam ikatan logam berat terdiri dari mineral lempung dan mineral oksida logam. Struktur berlapis dan muatan negatif pada mineral lempung memungkinkan terjadinya interaksi dengan ion logam berat seperti Pb, Cu, Zn, serta Cr. Selain itu, mineral oksida besi dan mangan berfungsi untuk menstabilkan logam berat dengan cara membentuk kompleks permukaan yang cukup kuat, sehingga mempercepat akumulasi logam berat di sedimen yang ada di dasar sungai.

Selain kandungan mineral, ukuran butir sedimen juga berkontribusi pada kemampuan penyerapan logam berat. Sedimen yang berukuran lebih halus biasanya memiliki area permukaan yang lebih luas serta tingkat mineral aktif yang lebih tinggi dibandingkan dengan sedimen yang lebih kasar, sehingga lebih efisien dalam mengumpulkan logam berat (Siddique dkk., 2025).

Dalam penelitian sedimen dasar sungai, analisis mineralogi menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD) digunakan untuk mengidentifikasi mineral dominan yang berpotensi mengontrol akumulasi logam berat sehingga informasi mineralogi tersebut menjadi dasar dalam menafsirkan karakteristik sedimen serta potensi kestabilan logam berat di lingkungan Daerah Aliran Sungai (DAS).

2.4.1 Mineral Lempung terhadap Akumulasi Logam Berat

Mineral lempung merupakan salah satu komponen utama penyusun sedimen halus yang memiliki peran signifikan dalam proses pengikatan logam berat dan akumulasi logam berat di lingkungan perairan. Keberadaan mineral lempung dalam sedimen dasar sungai umumnya berasal dari hasil pelapukan batuan induk di daerah aliran sungai (DAS) yang kemudian mengalami pengangkutan material oleh aliran sungai ke bagian hilir. Karena ukurannya yang sangat halus dan struktur kristalnya

yang khas, mineral lempung memiliki karakteristik fisik dan kimia yang mendukung proses pengikatan logam berat.

Secara struktural, mineral lempung tersusun atas lapisan tetrahedral silika dan oktahedral alumina yang membentuk struktur berlapis. Struktur ini menghasilkan luas permukaan spesifik yang besar dan muatan negatif pada permukaan mineral, sehingga menyediakan banyak situs aktif untuk berinteraksi dengan ion logam berat. Kapasitas pertukaran kation (cation exchange capacity) yang tinggi pada mineral lempung memungkinkan terjadinya pertukaran ion antara permukaan mineral dan ion logam berat terlarut seperti Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} , dan Zn^{2+} . Mekanisme ini menjadikan mineral lempung sangat efektif dalam pengikatan logam berat dari kolom air ke dalam fase sedimen.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa kemampuan mineral lempung dalam pengikatan logam berat tidak hanya ditentukan oleh luas permukaan dan muatan mineral, tetapi juga oleh jenis mineral lempung yang dominan serta kondisi lingkungan perairan. Mineral lempung tertentu menunjukkan afinitas yang lebih tinggi terhadap logam berat akibat perbedaan struktur kristal dan sifat kimia permukaan. Selain itu, proses pengikatan logam berat pada mineral lempung dapat berlangsung secara reversibel atau irreversibel tergantung pada kekuatan ikatan yang terbentuk antara logam dan permukaan mineral.

Dalam sedimen dasar sungai, mineral lempung juga sering berasosiasi dengan bahan organik. Asosiasi ini dapat meningkatkan kapasitas penahanan logam berat karena bahan organik memiliki gugus fungsi yang mampu membentuk kompleks dengan ion logam berat. Kombinasi antara mineral lempung dan bahan organik menjadikan sedimen halus sebagai media utama akumulasi logam berat dalam jangka waktu relatif panjang. Oleh karena itu, sedimen yang didominasi oleh fraksi lempung umumnya menunjukkan konsentrasi logam berat yang lebih tinggi dibandingkan sedimen berbutir kasar.

Dalam kajian mineralogi sedimen, identifikasi jenis dan dominasi mineral lempung menjadi aspek penting untuk memahami potensi akumulasi logam berat. Analisis menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD) memungkinkan penentuan fase mineral lempung secara kualitatif dan kuantitatif, sehingga dapat digunakan untuk menjelaskan keterkaitan antara karakteristik mineral sedimen dan

distribusi logam berat di sedimen dasar Sungai (P. Wang dkk., 2024). Oleh karena itu, identifikasi mineral penyusun sedimen melalui analisis XRD menjadi penting sebagai dasar dalam menafsirkan potensi pengikatan logam berat pada sedimen dasar sungai

2.4.2 Mineral Oksida Besi dan Mangan dalam Akumulasi Logam Berat

Selain mineral lempung, mineral oksida besi (Fe) dan mangan (Mn) merupakan komponen penyusun dalam sedimen dasar sungai yang berperan penting dalam proses penyerapan serta akumulasi logam berat. Keberadaan mineral lempung dalam sedimen dasar sungai umumnya berasal dari hasil pelapukan batuan induk di daerah aliran sungai (DAS) yang selanjutnya terangkut ke bagian hilir di lingkungan perairan dan ukurannya yang sangat halus serta struktur kristalnya yang khas menjadikan mineral lempung memiliki karakteristik fisik dan kimia yang mendukung proses pengikatan logam berat.

Mineral oksida besi dan mangan memiliki sifat kimia yang cukup reaktif karena permukaannya banyak mengandung gugus hidroksil yang berperan sebagai tempat menempelnya logam berat. Gugus hidroksil ini memungkinkan terbentuknya ikatan antara mineral oksida dan ion logam berat. Pada kondisi pH yang umum di perairan, permukaan oksida besi dan mangan cenderung bermuatan negatif, sehingga dapat menarik ion logam berat bermuatan positif, seperti Pb^{2+} , Cu^{2+} , Zn^{2+} , dan Cd^{2+} .

Peran mineral oksida besi dan mangan dalam sedimen tidak hanya terbatas pada proses penempelan logam berat di permukaan mineral, tetapi juga melibatkan proses kopresipitasi, yaitu proses ketika logam berat ikut terperangkap bersamaan dengan pembentukan mineral oksida. Proses ini menjadikan oksida besi dan mangan sebagai komponen penting yang berperan dalam mengendalikan ketersediaan dan pergerakan logam berat di dalam sedimen. Logam berat yang terikat pada fase oksida umumnya lebih stabil dibandingkan logam yang berada dalam air, sehingga cenderung terakumulasi dalam sedimen dasar.

Interaksi antara oksida besi dan mangan dengan logam berat sangat dipengaruhi oleh kondisi lingkungan, terutama pH dan kondisi redoks, yaitu kondisi yang berkaitan dengan ketersediaan oksigen dan proses oksidasi–reduksi di

perairan dan sedimen. Perubahan kondisi redoks dapat menyebabkan oksida besi dan mangan mengalami pelarutan atau terbentuk kembali, yang selanjutnya dapat memicu pelepasan atau pengikatan ulang logam berat. Oleh karena itu, oksida Fe–Mn sering dipandang sebagai komponen yang bersifat dinamis dalam siklus biogeokimia logam berat di lingkungan sedimen.

Penelitian terkini menunjukkan bahwa oksida besi dan mangan dapat berinteraksi dengan mineral lempung serta bahan organik di dalam sedimen, sehingga membentuk kompleks mineral–organik yang mampu meningkatkan kapasitas pengikatan logam berat pada permukaan partikel sedimen. Dalam kajian sedimen dasar sungai, pemahaman terhadap peran oksida Fe–Mn menjadi penting untuk menjelaskan mekanisme pengikatan logam berat serta tingkat kestabilannya di dalam sedimen (Sun dkk., 2023).

2.4.3 Pengaruh Ukuran Butir Sedimen terhadap Akumulasi Logam Berat

Ukuran butir sedimen merupakan salah satu faktor fisik yang memengaruhi kemampuan sedimen dalam menyerap dan menimbun logam berat. Sedimen dasar sungai tersusun atas berbagai ukuran partikel, mulai dari pasir, lanau, hingga lempung. Perbedaan ukuran partikel ini menyebabkan perbedaan luas permukaan dan sifat permukaan sedimen, sehingga kemampuan setiap fraksi dalam mengikat logam berat juga tidak sama.

Sedimen berukuran halus, seperti lanau dan lempung, umumnya memiliki luas permukaan yang lebih besar dibandingkan sedimen berukuran kasar. Luas permukaan yang besar menyediakan lebih banyak tempat bagi logam berat untuk menempel pada partikel sedimen. Oleh karena itu, logam berat cenderung lebih banyak terakumulasi pada sedimen halus dibandingkan pada sedimen berukuran kasar, seperti pasir atau kerikil.

Selain itu, ukuran butir sedimen juga berkaitan dengan kandungan bahan organik. Sedimen halus umumnya mengandung bahan organik yang lebih tinggi karena partikel berukuran kecil lebih mudah mengikat dan mempertahankan bahan organik. Bahan organik ini dapat berikatan dengan logam berat, sehingga meningkatkan potensi penumpukan logam berat pada sedimen halus.

Penyebaran ukuran butir sedimen juga mencerminkan kondisi aliran sungai. Daerah dengan kecepatan aliran yang rendah cenderung menjadi tempat pengendapan sedimen halus, sehingga berpotensi menjadi lokasi penumpukan logam berat. Sebaliknya, daerah dengan aliran yang lebih kuat umumnya didominasi oleh sedimen berukuran kasar yang memiliki kemampuan lebih rendah dalam mengikat logam berat. Dengan demikian, variasi ukuran butir sedimen dapat digunakan untuk menjelaskan pola sebaran logam berat pada sedimen dasar sungai.

Penelitian terbaru menunjukkan bahwa meskipun ukuran butir bukan satu-satunya faktor yang memengaruhi penumpukan logam berat, parameter ini tetap menjadi indikator penting dalam kajian sedimen. Kombinasi antara ukuran butir, jenis mineral, dan kandungan bahan organik menentukan kemampuan sedimen dalam mengikat logam berat. Dalam penelitian sedimen dasar Sungai Deli, analisis ukuran butir digunakan untuk membantu memahami hubungan antara karakteristik fisik sedimen dan potensi penumpukan logam berat di lingkungan perairan (Dierriska dkk., 2024).

2.5 Logam Berat dalam Sedimen Sungai

Logam berat merupakan unsur logam yang memiliki massa jenis tinggi dan dapat bersifat berbahaya apabila terakumulasi pada konsentrasi tertentu di lingkungan perairan. Dalam sistem sungai, logam berat umumnya berikatan dengan partikel sedimen, terutama sedimen berukuran halus yang memiliki luas permukaan besar dan kemampuan tinggi dalam menahan logam berat. Oleh karena itu, sedimen dasar sungai sering berperan sebagai tempat penyimpanan utama logam berat dalam jangka waktu yang lebih lama dibandingkan air sungai, sehingga sedimen kerap digunakan sebagai indikator untuk menilai kondisi pencemaran logam berat (Fadlillah dkk., 2022).

Jenis logam berat yang umum ditemukan dalam sedimen sungai antara lain mangan (Mn), timbal (Pb), tembaga (Cu), dan besi (Fe). Keberadaan logam-logam tersebut dapat berasal dari aktivitas manusia di wilayah Daerah Aliran Sungai (DAS) maupun dari proses alami, seperti pelapukan batuan dan erosi tanah. Sebagai contoh, penelitian yang dilakukan di Sungai Kuin menunjukkan adanya kandungan logam berat Mn, Pb, Cu, dan Fe dalam sedimen, yang dipengaruhi oleh aktivitas

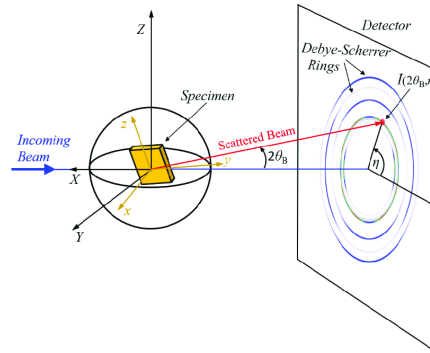
permukiman serta pola penggunaan lahan di daerah aliran sungai tersebut (Wibowo dkk., 2022).

Sedimen dasar sungai tidak hanya berperan sebagai tempat penyimpanan logam berat, tetapi juga dapat menjadi sumber pencemar sekunder ketika terjadi perubahan kondisi lingkungan. Perubahan pH, fluktuasi debit aliran, serta kondisi redoks dapat memicu pelepasan kembali logam berat dari sedimen ke dalam air sungai. Hal ini menunjukkan bahwa sedimen tidak bersifat tetap, melainkan dinamis dan dapat merespons perubahan kondisi hidrometeorologi maupun aktivitas manusia di perairan sungai. Oleh karena itu, pemahaman terhadap kondisi tersebut penting dalam upaya pengelolaan kualitas lingkungan perairan (Fadlillah dkk., 2022).

Penelitian lokal lainnya juga menunjukkan bahwa sedimen dasar sungai dapat digunakan untuk menggambarkan tingkat pencemaran logam berat di suatu perairan sungai. Sebagai contoh, penelitian yang dilakukan di Sungai Belayan, Kalimantan Timur, mengidentifikasi adanya keterkaitan antara aktivitas industri, limbah domestik, dan kandungan logam berat dalam sedimen. Hasil penelitian tersebut menunjukkan adanya perbedaan pola pencemaran logam berat di sepanjang aliran sungai (Tulzuhrah dkk., 2022).

Informasi mengenai distribusi logam berat pada sedimen dasar sungai merupakan dasar penting dalam kajian kualitas lingkungan perairan, termasuk dalam penelitian ini. Pemahaman terhadap karakteristik logam berat memberikan konteks dalam menafsirkan hasil analisis sedimen dasar Sungai Deli, khususnya untuk menilai potensi akumulasi logam berat serta keterkaitannya dengan karakteristik fisik dan kimia sedimen.

2.6 Metode X-Ray Diffraction (XRD)



Gambar 2.3: Skema Geometri Pengukuran X-Ray Diffraction (XRD)

(Jóni dkk., 2020)

X-Ray Diffraction (XRD) merupakan metode analisis yang digunakan untuk mengenali jenis mineral berdasarkan pola difraksi sinar-X yang dihasilkan oleh struktur kristal suatu material. Setiap mineral memiliki pola difraksi yang berbeda dan khas, sehingga pola tersebut dapat digunakan sebagai dasar untuk mengidentifikasi mineral penyusun suatu sampel. Metode XRD banyak dimanfaatkan dalam kajian geologi dan lingkungan karena mampu memberikan informasi mengenai mineralogi secara cepat dan relatif akurat (Drake dkk., 2020). Prinsip kerja metode X-Ray Diffraction (XRD) secara skematis ditunjukkan pada Gambar 2.3.

Dalam kajian sedimen sungai, metode XRD digunakan untuk mengetahui jenis mineral dominan dan mineral penyerta yang menyusun sedimen dasar sungai. Informasi mineralogi yang diperoleh melalui analisis XRD penting untuk memahami asal-usul sedimen serta proses lingkungan yang memengaruhi pembentukannya. Meskipun metode XRD tidak digunakan untuk menentukan konsentrasi logam berat secara kuantitatif, hasil analisis mineralogi dapat dimanfaatkan sebagai dasar dalam menafsirkan karakteristik sedimen serta potensi keberadaan logam berat di lingkungan perairan.

Berdasarkan kajian tersebut, metode X-Ray Diffraction (XRD) digunakan dalam penelitian ini untuk mengidentifikasi fase mineral penyusun sedimen dasar sungai. Hasil analisis XRD selanjutnya digunakan untuk memahami karakteristik

sedimen serta potensi keterkaitannya dengan keberadaan logam berat di Daerah Aliran Sungai (DAS) Sungai Deli. Dengan demikian, metode XRD dalam penelitian ini digunakan sebagai pendekatan untuk mengidentifikasi mineral penyusun sedimen yang berpotensi mengontrol keberadaan logam berat, bukan untuk mengukur konsentrasi logam berat secara langsung.

2.7 Kajian Penelitian Terdahulu

Kajian terdahulu digunakan dalam penelitian ini untuk menelaah hasil penelitian sebelumnya yang berkaitan dengan karakterisasi sedimen sungai melalui analisis mineralogi. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa metode X-Ray Diffraction (XRD) banyak digunakan untuk mengidentifikasi mineral penyusun sedimen dasar sungai. Informasi yang diperoleh dari kajian terdahulu memberikan gambaran mengenai jenis mineral yang umum dijumpai serta proses lingkungan yang memengaruhi pembentukan sedimen. Selain itu, kajian ini membantu menjelaskan kelebihan dan keterbatasan metode XRD dalam studi sedimen lingkungan. Oleh karena itu, kajian terdahulu menjadi dasar dalam penentuan pendekatan penelitian yang digunakan.

Penelitian mengenai karakterisasi mineral sedimen sungai telah banyak dilakukan dengan menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD) (Y. Zhang dkk., 2021) melakukan analisis mineralogi pada sedimen sungai untuk mengidentifikasi mineral dominan dan mineral penyerta yang terbentuk melalui proses sedimentasi. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa variasi komposisi mineral sedimen sangat dipengaruhi oleh kondisi geologi serta sumber material dari daerah aliran sungai. Temuan ini menegaskan bahwa metode XRD efektif digunakan untuk memahami karakteristik sedimen sungai sebagai dasar dalam menafsirkan proses lingkungan.

Kajian lain dilakukan oleh (Sojka, 2022) yang meneliti hubungan antara karakteristik sedimen sungai dan dinamika hidrologi di daerah aliran sungai. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa komposisi mineral sedimen mencerminkan proses pengangkutan material dari bagian hulu hingga ke hilir sungai. Hasil kajian ini memperlihatkan bahwa analisis mineralogi sedimen dapat digunakan untuk memahami keterkaitan antara proses hidrologi dan karakteristik lingkungan sungai.

Temuan tersebut menegaskan pentingnya kajian sedimen dasar sungai dalam studi lingkungan perairan.

Penelitian oleh (Zheng dkk., 2020), Penelitian tersebut membahas peran mineral sedimen dalam mengendalikan interaksi kimia di lingkungan perairan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa mineral lempung dan oksida besi memiliki kemampuan yang tinggi dalam pengikatan logam berat unsur logam. Kondisi ini menyebabkan komposisi mineral sedimen berpengaruh terhadap potensi keberadaan logam berat pada sedimen dasar sungai. Temuan tersebut menegaskan bahwa analisis mineralogi merupakan pendekatan yang penting dalam kajian sedimen lingkungan.

Selain itu, (Amardika dkk., 2025) Penelitian tersebut melakukan analisis mineralogi sedimen sungai menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD) dan menemukan bahwa mineral silikat serta mineral lempung merupakan komponen dominan penyusun sedimen dasar sungai. Hasil penelitian menunjukkan bahwa karakteristik mineral sedimen dapat dimanfaatkan untuk menafsirkan proses pengangkutan dan pengendapan sedimen di sungai. Penggunaan metode XRD dalam penelitian tersebut menegaskan relevansi metode ini dalam kajian sedimen lingkungan. Temuan tersebut menjadi salah satu dasar dalam pemilihan metode XRD pada penelitian ini.

Berdasarkan kajian teori dan penelitian terdahulu yang telah diuraikan, sedimen dasar sungai dapat dipahami sebagai komponen penting dalam kajian lingkungan perairan karena mampu merekam proses hidrologi serta kondisi Daerah Aliran Sungai (DAS). Komposisi dan karakteristik mineral sedimen, khususnya mineral lempung dan oksida logam, berperan dalam mengendalikan sifat fisik dan kimia sedimen serta potensinya dalam pengikatan logam berat logam berat. Berbagai penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa metode X-Ray Diffraction (XRD) efektif digunakan untuk mengidentifikasi fase mineral penyusun sedimen dasar sungai.

Meskipun demikian, kajian mengenai karakteristik mineral sedimen dasar pada bagian hulu Sungai Deli masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengidentifikasi mineral penyusun sedimen dasar Sungai Deli menggunakan metode XRD sebagai dasar dalam menafsirkan karakteristik sedimen serta potensi

keterkaitannya dengan keberadaan logam berat. Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini selanjutnya dibahas pada Bab III.

Tabel 2.1: Penelitian Terdahulu Terkait Sedimen Sungai dan Logam Berat

No	Peneliti & Tahun	Lokasi Penelitian	Metode Analisis	Hasil Utama	Keterkaitan dengan Penelitian Ini
1	(Y. Zhang dkk., 2021)	Sungai di China	X-Ray Diffraction (XRD)	Mineral silikat dan lempung mendominasi sedimen sungai dan dipengaruhi kondisi geologi DAS	Menjadi dasar penggunaan metode XRD untuk identifikasi mineral sedimen
2	(Sojka, 2022)	Sungai di Polandia	Analisis sedimen dan hidrologi	Karakteristik sedimen mencerminkan proses transport material dari hulu ke hilir	Mendukung penggunaan sedimen sebagai indikator kondisi lingkungan DAS
3	(Zheng dkk., 2020)	Sungai di China	XRD dan analisis mineralogi	Mineral lempung dan oksida besi berperan penting dalam pengikatan logam berat logam berat	Memperkuat hubungan antara mineral sedimen dan potensi akumulasi logam berat

Tabel 2.2: Lanjutan Penelitian Terdahulu

4	(Wibowo dkk., 2022)	Sungai Kuin, Indonesia	Analisis logam berat sedimen	Ditemukan logam Mn, Pb, Cu, dan Fe pada sedimen dasar sungai	Menunjukkan relevansi kajian logam berat pada sedimen sungai di Indonesia
5	(Amardika dkk., 2025)	Sungai Masamba, Indonesia	X-Ray Diffraction (XRD)	Sedimen didominasi mineral silikat dan lempung hasil transport material hulu	Menjadi referensi lokal penggunaan XRD pada sedimen sungai

2.8 Kerangka Pemikiran Penelitian

Sedimen dasar sungai merupakan hasil akumulasi material yang berasal dari proses pelapukan batuan, pengangkutan oleh aliran sungai, serta aktivitas alam maupun antropogenik di Daerah Aliran Sungai (DAS). Material sedimen tersebut mengandung berbagai jenis mineral dengan karakteristik fisik dan kimia yang berbeda. Komposisi mineral dalam sedimen berperan penting dalam menentukan sifat sedimen, termasuk kemampuannya dalam berinteraksi dengan unsur-unsur lain di lingkungan perairan.

Berdasarkan kajian penelitian terdahulu, diketahui bahwa beberapa jenis mineral, terutama mineral lempung dan mineral oksida, memiliki kemampuan untuk menyerap pada permukaan dan mengikat logam berat. Keberadaan mineral-mineral tersebut dapat memengaruhi distribusi dan akumulasi logam berat dalam sedimen dasar sungai. Oleh karena itu, karakteristik mineral sedimen dapat digunakan sebagai indikator untuk memahami potensi keberadaan logam berat di lingkungan perairan.

Kondisi lingkungan Daerah Aliran Sungai (DAS) Sungai Deli, seperti aktivitas permukiman, industri, serta perubahan penggunaan lahan di sepanjang aliran sungai, berpotensi memengaruhi proses pembentukan dan distribusi sedimen. Proses pengangkutan dan pengendapan material dari bagian hulu hingga hilir sungai turut menentukan jenis serta karakteristik mineral yang terendapkan pada sedimen dasar sungai. Dengan demikian, analisis mineralogi sedimen menjadi penting untuk menggambarkan kondisi lingkungan perairan Sungai Deli secara menyeluruh.

Dalam penelitian ini, metode X-Ray Diffraction (XRD) digunakan untuk mengidentifikasi fase mineral penyusun sedimen dasar Sungai Deli. Data hasil identifikasi mineral selanjutnya dianalisis secara deskriptif untuk menentukan jenis mineral dominan dan karakteristik sedimen. Hasil analisis tersebut kemudian diinterpretasikan dengan mengaitkan komposisi mineral sedimen terhadap kondisi lingkungan Daerah Aliran Sungai (DAS) Sungai Deli serta potensi keberadaan logam berat di dalam sedimen.

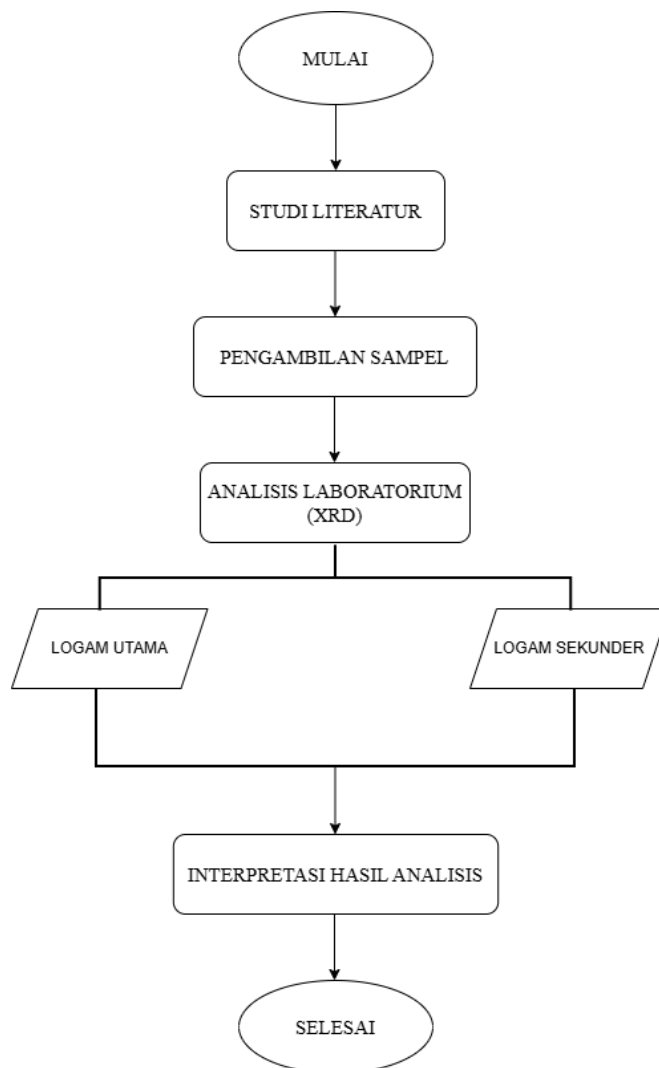
Kerangka pemikiran ini menjadi dasar dalam pelaksanaan penelitian, mulai dari pengambilan sampel sedimen, pengujian menggunakan metode XRD, hingga analisis dan interpretasi data. Dengan pendekatan tersebut, penelitian ini diharapkan mampu memberikan gambaran mengenai karakteristik mineral sedimen dasar Sungai Deli serta keterkaitannya dengan potensi keberadaan logam berat di lingkungan perairan.

BAB 3

METODE PENELITIAN

3.1 Bagan Alir Penelitian

Tahapan penelitian ini disusun secara sistematis dan disajikan dalam bentuk bagan alir penelitian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.1. Penyusunan alur penelitian bertujuan untuk memastikan bahwa setiap tahapan penelitian dilakukan secara terstruktur dan berkesinambungan. Dengan adanya bagan alir penelitian, proses pelaksanaan penelitian dapat dipahami dengan lebih jelas dan sistematis.



Gambar 3.1: Bagan alir penelitian

Tahapan penelitian ini disusun secara sistematis dan disajikan dalam bentuk bagan alir penelitian sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3.1. Bagan alir penelitian bertujuan untuk menggambarkan alur pelaksanaan penelitian secara terstruktur, mulai dari tahap persiapan hingga interpretasi hasil.

Bagan alir penelitian terdiri atas beberapa tahapan utama. Tahap awal adalah studi literatur, yang dilakukan untuk memperoleh dasar teori mengenai sedimen dasar sungai, mineralogi sedimen, serta keterkaitan karakteristik mineral dengan potensi akumulasi logam berat berdasarkan penelitian terdahulu. Studi literatur ini menjadi dasar dalam penentuan pendekatan dan metode penelitian yang digunakan.

Tahap berikutnya adalah pengambilan sampel sedimen dasar sungai pada segmen hulu Daerah Aliran Sungai (DAS) Sungai Deli. Pengambilan sampel dilakukan dengan mempertimbangkan kondisi fisik sungai, aksesibilitas lokasi, dan representativitas sedimen. Sampel yang diambil merupakan sedimen permukaan karena lapisan ini paling aktif berinteraksi dengan kolom air dan proses lingkungan.

Sampel sedimen yang telah diambil selanjutnya dilakukan preparasi dan analisis laboratorium menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD) untuk mengidentifikasi fase mineral penyusun sedimen dasar sungai. Analisis XRD bertujuan untuk memperoleh informasi mengenai jenis mineral dominan dan mineral penyerta dalam sedimen.

Tahap selanjutnya adalah analisis dan interpretasi data secara deskriptif kualitatif. Hasil identifikasi mineral sedimen dianalisis untuk menentukan karakteristik mineral sedimen dasar sungai. Karakteristik mineral tersebut kemudian diinterpretasikan dengan mengaitkannya pada potensi keberadaan logam berat di sedimen berdasarkan kajian pustaka dan teori yang relevan.

Tahap akhir penelitian adalah penarikan kesimpulan, yang merangkum hasil identifikasi karakteristik mineral sedimen serta keterkaitannya dengan potensi akumulasi logam berat pada sedimen dasar hulu Sungai Deli.

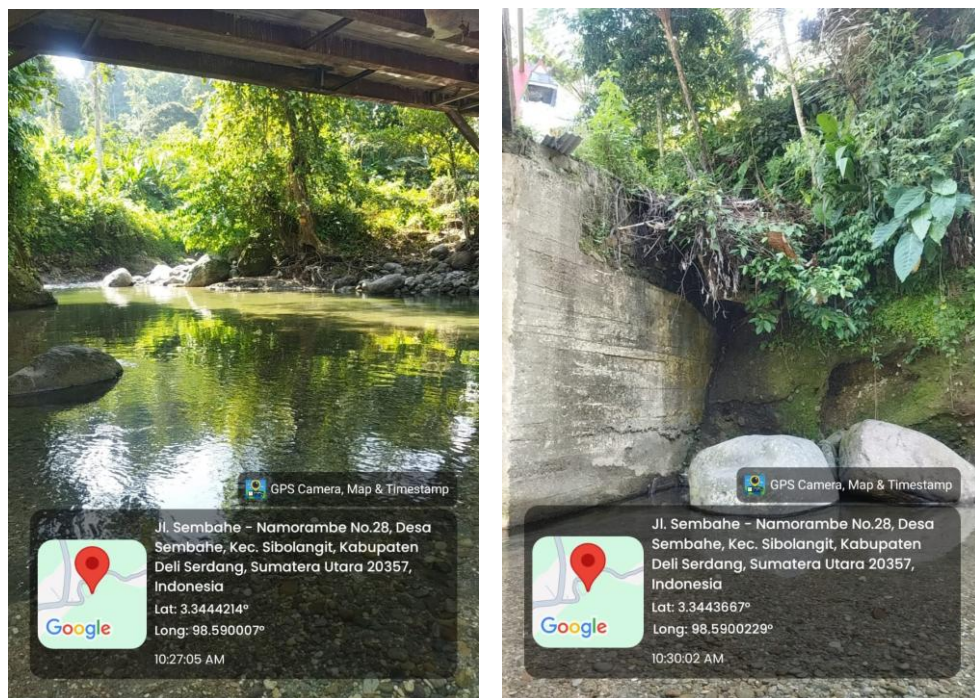
3.2 Lokasi Penelitian

Penelitian ini berlokasi di bagian hulu Daerah Aliran Sungai (DAS) Sungai Deli, tepatnya di sekitar Jembatan Sembahe, Kabupaten Deli Serdang, Provinsi Sumatera Utara. Penentuan lokasi penelitian diawali dari Titik Awal yang berada di sekitar Jembatan Sembahe sebagai titik acuan.

Titik pengambilan sampel sedimen ditetapkan pada Titik T2 (Tikungan 2) yang berada pada segmen sungai berkelok di arah hulu dari Jembatan Sembahe. Pemilihan titik ini didasarkan pada karakteristik morfologi sungai berupa tikungan, yang secara hidrodinamik berpotensi menjadi zona akumulasi sedimen dasar.

Arah penentuan lokasi penelitian ditunjukkan melalui alur sungai dari Titik Awal menuju Titik T2 sebagaimana ditampilkan pada peta lokasi penelitian. Peta tersebut digunakan untuk memberikan gambaran spasial mengenai posisi titik pengambilan sampel terhadap kondisi lingkungan sekitar Sungai Deli.

Dokumentasi lapangan kondisi Sungai Deli pada lokasi pengambilan sampel sedimen dasar (Titik T2) di sekitar Jembatan Sembahe yang memperlihatkan kondisi alur sungai dan tebing sungai pada segmen hulu.



Gambar 3.2: Lokasi Pengambilan Sampel Sedimen Dasar Sungai Deli
(Sumber: Penulis, 2026)



Gambar 3.3: Titik Pengambilan Sampel Sedimen Hulu Sungai Deli

Sumber: Google Earth Pro

3.3 Populasi dan Sampel

Populasi dalam penelitian ini adalah sedimen dasar sungai yang terdapat pada segmen hulu Daerah Aliran Sungai (DAS) Sungai Deli, Provinsi Sumatera Utara. Sedimen dasar dipilih sebagai objek penelitian karena berfungsi sebagai media akumulasi material hasil proses pelapukan, pengangkutan dan sedimentasi yang mencerminkan kondisi lingkungan sungai dalam periode tertentu.

Sampel penelitian berupa sedimen dasar sungai yang diambil dari satu titik pengambilan sampel, yaitu Titik T2 (Tikungan 2) pada segmen hulu Daerah Aliran Sungai (DAS) Sungai Deli. Pengambilan sampel dilakukan menggunakan metode purposive sampling dengan mempertimbangkan kondisi fisik sungai, karakteristik dasar sungai, serta kemudahan akses lokasi. Sampel yang diambil merupakan sedimen permukaan karena lapisan ini paling aktif berinteraksi dengan kolom air dan proses lingkungan perairan.

3.4 Data Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data yang berkaitan dengan karakteristik mineral penyusun sedimen dasar sungai. Data tersebut digunakan sebagai dasar dalam menafsirkan kondisi sedimen serta potensi keterkaitannya dengan keberadaan logam berat di lingkungan perairan.

3.4.1 Jenis dan Sumber Data

Data penelitian merupakan komponen utama yang digunakan untuk mendukung analisis dan interpretasi hasil penelitian. Data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas data primer dan data sekunder.

Data primer merupakan data utama yang diperoleh secara langsung dari hasil pengambilan sampel sedimen dasar sungai dan analisis laboratorium. Data primer berupa hasil analisis mineralogi sedimen dasar sungai menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD), yang meliputi identifikasi jenis mineral penyusun sedimen.

Data sekunder merupakan data pendukung yang diperoleh dari sumber tidak langsung. Data sekunder meliputi peta lokasi penelitian, informasi umum mengenai DAS Sungai Deli, serta data dan teori yang diperoleh dari jurnal ilmiah, buku

referensi, dan laporan penelitian terdahulu. Data sekunder digunakan untuk mendukung interpretasi hasil penelitian.

3.4.2 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data primer dilakukan melalui pengambilan satu sampel sedimen dasar sungai secara langsung di lokasi penelitian, yaitu pada Titik T2 (Tikungan 2). Sampel sedimen diambil menggunakan metode grab sampling pada lapisan sedimen permukaan.

Sampel sedimen selanjutnya dianalisis menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD) untuk mengidentifikasi karakteristik mineral penyusun sedimen dasar sungai. Hasil analisis mineralogi digunakan sebagai dasar untuk menginterpretasikan potensi keberadaan logam berat secara tidak langsung berdasarkan keterkaitan antara mineral sedimen dan logam berat yang telah dilaporkan dalam kajian pustaka.

Pengumpulan data sekunder dilakukan melalui studi literatur dan penelusuran dokumen pendukung dari sumber-sumber ilmiah yang relevan.

3.5 Variabel Penelitian

Variabel dalam penelitian ini adalah karakteristik mineral sedimen dasar sungai, yang diidentifikasi melalui analisis mineralogi menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD). Karakteristik mineral sedimen meliputi jenis mineral dominan dan mineral penyerta yang menyusun sedimen dasar sungai.

Karakteristik mineral sedimen tersebut digunakan sebagai dasar untuk menginterpretasikan potensi keberadaan logam berat dalam sedimen dasar sungai berdasarkan kajian teori dan penelitian terdahulu. Penelitian ini tidak menggunakan logam berat sebagai variabel terukur, melainkan sebagai objek interpretasi yang dikaitkan dengan karakteristik mineral sedimen.

3.6 Metode Analisis Data

Metode analisis data dalam penelitian ini dilakukan secara deskriptif kualitatif. Data hasil analisis X-Ray Diffraction (XRD) berupa pola difraksi digunakan untuk mengidentifikasi fase mineral penyusun sedimen dasar sungai.

Hasil identifikasi mineral sedimen selanjutnya dianalisis untuk menentukan karakteristik mineral sedimen dasar sungai yang berpotensi berperan dalam proses pengikatan logam berat dan akumulasi logam berat. Interpretasi dilakukan dengan mengaitkan hasil analisis mineralogi dengan teori dan hasil penelitian terdahulu yang membahas hubungan antara mineral sedimen dan logam berat.

Metode X-Ray Diffraction (XRD) dalam penelitian ini tidak digunakan untuk mengukur konsentrasi logam berat secara kuantitatif, melainkan sebagai pendekatan untuk memahami karakteristik mineral sedimen yang berpotensi mengontrol keberadaan logam berat di lingkungan sedimen dasar sungai.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Analisis X-Ray Diffraction (XRD) Sedimen Dasar Sungai Deli

Analisis X-Ray Diffraction (XRD) dilakukan terhadap sampel sedimen dasar Sungai Deli yang diambil pada Titik T2 (Tikungan 2) di segmen hulu kawasan Sembaha. Analisis ini bertujuan untuk mengidentifikasi fase mineral penyusun sedimen sebagai dasar dalam mendeskripsikan karakteristik mineral sedimen serta menginterpretasikan potensi keterkaitannya dengan unsur logam berdasarkan kajian pustaka.

Pola difraksi hasil pengujian diolah menggunakan perangkat lunak Match! Phase Analysis berbasis basis data COD-Inorganic melalui metode *search-match*. Estimasi persentase masing-masing fase mineral diperoleh secara semi-kuantitatif menggunakan metode *Reference Intensity Ratio* (RIR), sehingga hasil yang diperoleh menggambarkan proporsi relatif fase mineral dan bukan komposisi kuantitatif absolut.

Hasil identifikasi menunjukkan bahwa sampel sedimen didominasi oleh mineral kuarsa (SiO_2), disertai satu fase hasil pencocokan yang memiliki tingkat kesesuaian lebih rendah serta masih memerlukan verifikasi lebih lanjut. Selain itu, sebagian kecil area puncak difraksi belum dapat dicocokkan dengan fase mineral yang tersedia pada basis data. Estimasi komposisi fase mineral disajikan pada Tabel 4.1.

Dominasi kuarsa menunjukkan bahwa sedimen dasar Sungai Deli pada lokasi penelitian terutama tersusun oleh mineral silikat yang relatif stabil terhadap proses pelapukan. Sementara itu, keberadaan fase hasil pencocokan kedua belum dapat diinterpretasikan sebagai mineral alami secara pasti karena identifikasinya masih bersifat tentatif. Oleh sebab itu, pembahasan selanjutnya difokuskan pada karakteristik masing-masing fase mineral serta keterbatasan interpretasi hasil identifikasi menggunakan metode XRD.

Tabel 4.1: Estimasi Komposisi Fase Mineral Sedimen Dasar Pada Titik T2

No	Fase Mineral	Rumus Kimia	(%)	Keterangan
1	Kuarsa	SiO_2	56,3	Mineral dominan penyusun sedimen
2	Fase hasil pencocokan Match!	$Cu_2Fe_2Ge_4O_{13}$	43,7	Hasil identifikasi sementara, masih memerlukan verifikasi
—	Tidak teridentifikasi	—	16,3	Area puncak yang belum dapat dicocokkan

Catatan: Fase kedua merupakan hasil pencocokan menggunakan perangkat lunak Match! Phase Analysis berbasis COD-Inorganic sehingga belum dapat dipastikan sebagai mineral alami. Persentase 16,3% merupakan proporsi area puncak yang belum teridentifikasi, bukan bagian dari komposisi mineral hasil estimasi RIR.

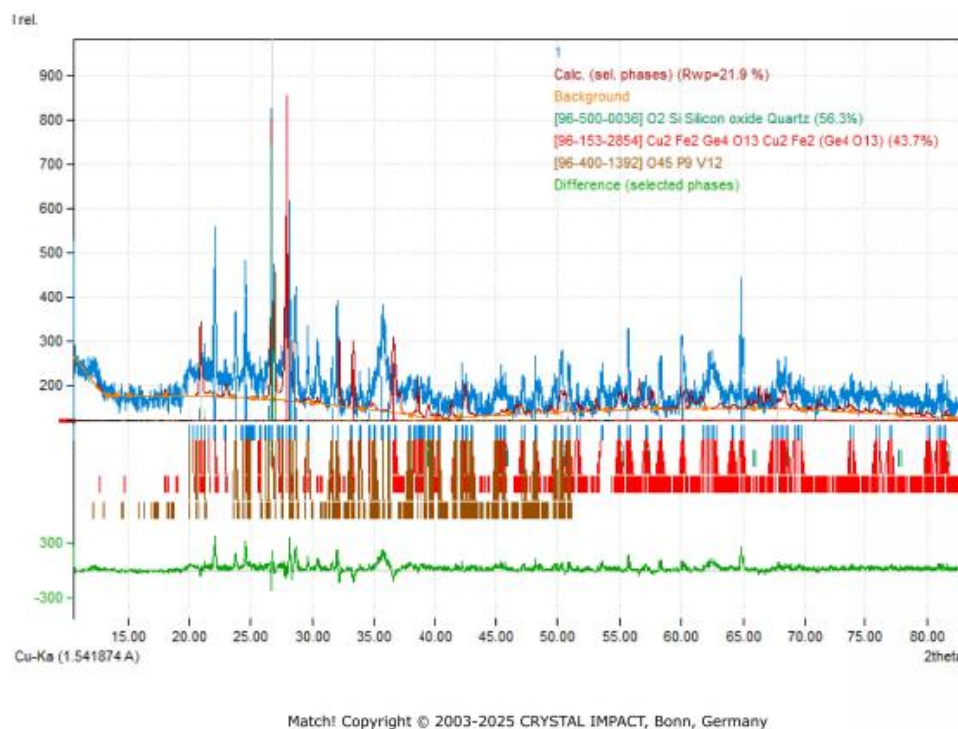
Berdasarkan hasil identifikasi fase mineral yang disajikan pada Tabel 4.1, sedimen dasar Sungai Deli pada Titik T2 didominasi oleh mineral kuarsa (SiO_2). Selain fase dominan tersebut, teridentifikasi pula satu fase hasil pencocokan dengan tingkat kecocokan yang lebih rendah serta masih terdapat sebagian area puncak difraksi yang belum dapat diidentifikasi. Temuan ini menunjukkan bahwa komposisi mineral sedimen tidak seluruhnya dapat dijelaskan melalui proses identifikasi fase yang dilakukan. Oleh karena itu, karakteristik masing-masing fase mineral serta keterbatasan interpretasi hasil identifikasi dibahas lebih lanjut pada subbab berikutnya.

4.1.1 Pola Difraksi XRD Sedimen Dasar Sungai Deli

Difraktogram hasil analisis X-Ray Diffraction (XRD) pada sampel sedimen dasar Sungai Deli disajikan pada Gambar 4.1. Pola difraksi tersebut memperlihatkan distribusi puncak-puncak difraksi dengan variasi intensitas yang mencerminkan keberadaan beberapa fase mineral kristalin di dalam sampel. Setiap puncak difraksi merepresentasikan bidang kristal tertentu yang selanjutnya digunakan sebagai dasar dalam proses identifikasi fase mineral melalui pencocokan terhadap basis data referensi.

Secara visual, difraktogram pada Gambar 4.1 memperlihatkan puncak utama pada sudut $2\theta = 26,72^\circ$ dengan intensitas relatif paling tinggi. Puncak tersebut merupakan karakteristik mineral kuarsa (SiO_2) dan menunjukkan bahwa kuarsa merupakan fase mineral dominan dalam sampel sedimen. Selain puncak utama tersebut, tampak beberapa puncak lain yang berasosiasi dengan kuarsa, serta sejumlah puncak yang memiliki kemiripan dengan fase hasil pencocokan kedua dan beberapa puncak yang belum dapat diidentifikasi secara pasti.

Untuk memperjelas interpretasi pola difraksi, beberapa puncak diagnostik dipilih sebagai dasar identifikasi fase mineral. Puncak-puncak tersebut disajikan pada Tabel 4.2 dan digunakan dalam pembahasan karakteristik masing-masing fase mineral.



Gambar 4.1: Pola Difraksi XRD Sedimen Sungai Deli Titik T2

Interpretasi pola difraksi dilakukan dengan membandingkan posisi puncak difraksi (2θ), nilai d -spacing, dan intensitas relatif terhadap data referensi pada basis data COD-Inorganic menggunakan perangkat lunak Match! Phase Analysis. Ketiga parameter tersebut digunakan secara terpadu untuk mengidentifikasi fase mineral penyusun sedimen dasar Sungai Deli.

Salah satu parameter penting dalam proses identifikasi adalah nilai *d-spacing*, yaitu jarak antar bidang kristal yang dihitung berdasarkan Hukum Bragg sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (4.1).

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad \text{Pers. (4.1)}$$

Dalam penelitian ini digunakan radiasi sinar-X Cu-K α dengan panjang gelombang (λ) sebesar 1,541874 Å dan orde difraksi pertama ($n = 1$). Nilai *d-spacing* yang diperoleh kemudian dikombinasikan dengan posisi sudut difraksi (2θ) dan intensitas relatif untuk menentukan tingkat kesesuaian pola difraksi sampel terhadap data referensi, sehingga fase mineral penyusun sedimen dapat diidentifikasi. Hasil identifikasi puncak-puncak difraksi utama disajikan pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2: Puncak Difraksi Utama XRD Sedimen Sungai Deli T2

No. Peak	2 θ (°)	d-spacing (Å)	I/I ₀	Interpretasi Fase Mineral
37	26,72	3,3364	1000	Kuarsa (SiO ₂) – puncak utama
9	20,94	4,2424	225,07	Kuarsa (SiO ₂) / <i>overlap</i> Cu ₂ Fe ₂ Ge ₄ O ₁₃
79	39,50	2,2814	113,37	Kuarsa (SiO ₂)
43	27,88	3,2002	522,17	Fase hasil pencocokan Cu ₂ Fe ₂ Ge ₄ O ₁₃
23	24,55	3,6262	406,55	Fase hasil pencocokan Cu ₂ Fe ₂ Ge ₄ O ₁₃
38	26,79	3,3278	500,00	Fase hasil pencocokan Cu ₂ Fe ₂ Ge ₄ O ₁₃ (<i>peak overlap</i>)
131	64,82	1,4384	448,56	Fase hasil pencocokan Cu ₂ Fe ₂ Ge ₄ O ₁₃
45	28,13	3,1723	617,18	Belum teridentifikasi pasti

Keterangan: Nilai d-spacing dihitung menggunakan Hukum Bragg, yaitu $d = \lambda / (2 \sin \theta)$, dengan panjang gelombang sinar-X Cu-K α (λ) sebesar 1,541874 Å. Nilai I/I_0 menunjukkan intensitas relatif terhadap puncak dengan intensitas tertinggi, sedangkan data lengkap 156 puncak difraksi disajikan pada Lampiran.

Berdasarkan hasil identifikasi pada Tabel 4.2, puncak nomor 37 memiliki nilai *d-spacing* sebesar 3,3364 Å pada sudut $2\theta = 26,72^\circ$, yang sesuai dengan karakteristik mineral kuarsa (SiO₂). Kesesuaian posisi puncak, nilai *d-spacing*, dan intensitas relatif yang tinggi menunjukkan bahwa kuarsa merupakan fase mineral dominan dalam sampel sedimen dasar Sungai Deli. Identifikasi tersebut diperkuat oleh keberadaan puncak nomor 79 pada sudut $2\theta = 39,50^\circ$ dengan nilai *d-spacing* sebesar 2,2814 Å yang juga sesuai dengan pola difraksi kuarsa. Konsistensi kemunculan beberapa puncak karakteristik tersebut mengonfirmasi bahwa kuarsa merupakan penyusun utama sedimen pada lokasi penelitian.

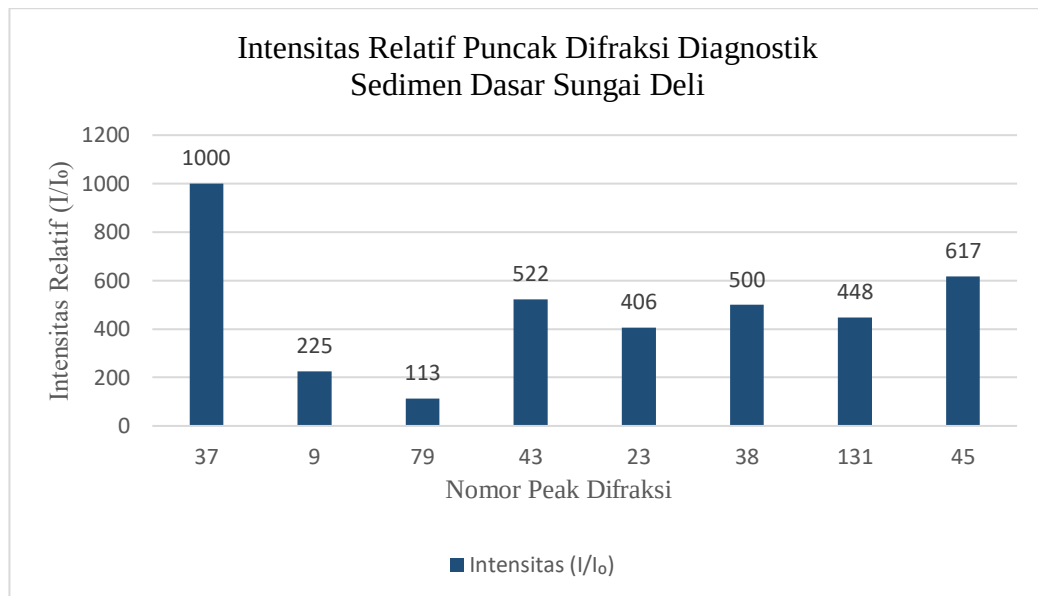
Dominasi kuarsa menunjukkan bahwa sedimen dasar Sungai Deli tersusun terutama oleh mineral silikat yang relatif stabil terhadap proses pelapukan, transportasi, dan pengendapan. Karakteristik tersebut menyebabkan kuarsa tetap bertahan selama proses sedimentasi sehingga menjadi fase mineral yang paling dominan pada lokasi penelitian.

Selain fase kuarsa, beberapa puncak difraksi yaitu puncak nomor 23 ($2\theta = 24,55^\circ$), nomor 43 ($2\theta = 27,88^\circ$), dan nomor 131 ($2\theta = 64,82^\circ$) menunjukkan kemiripan dengan fase hasil pencocokan Cu₂Fe₂Ge₄O₁₃ berdasarkan proses *search-match* menggunakan perangkat lunak Match! Phase Analysis. Namun demikian, fase tersebut memiliki tingkat kecocokan yang lebih rendah dibandingkan kuarsa sehingga identifikasinya masih bersifat tentatif. Oleh karena itu, fase hasil pencocokan tersebut belum dapat diinterpretasikan sebagai mineral alami secara pasti dan masih memerlukan verifikasi menggunakan metode analisis komplementer.

Perlu diperhatikan bahwa puncak nomor 38 pada sudut $2\theta = 26,79^\circ$ berada sangat berdekatan dengan puncak utama kuarsa pada $2\theta = 26,72^\circ$. Kedekatan posisi kedua puncak tersebut berpotensi menyebabkan terjadinya tumpang-tindih (*peak overlap*) sehingga menyulitkan proses pemisahan kedua fase secara jelas. Kondisi

ini menunjukkan bahwa identifikasi fase mineral tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan satu puncak difraksi, tetapi harus mempertimbangkan keseluruhan pola difraksi, tingkat kecocokan terhadap data referensi, serta kondisi geologi daerah penelitian. Dengan demikian, interpretasi terhadap fase hasil pencocokan kedua dilakukan secara hati-hati dan memiliki tingkat keyakinan yang lebih rendah dibandingkan fase kuarsa.

Sebagai pelengkap interpretasi pola difraksi, distribusi intensitas relatif setiap puncak diagnostik divisualisasikan dalam bentuk diagram batang sebagaimana disajikan pada Gambar 4.2. Diagram tersebut memudahkan perbandingan intensitas relatif antar puncak difraksi sehingga kontribusi masing-masing puncak terhadap identifikasi fase mineral dapat diamati dengan lebih jelas.



Gambar 4.2: Diagram Intensitas Relatif Difraksi Sedimen Sungai Deli

Berdasarkan Gambar 4.2, puncak pada sudut $2\theta = 26,72^\circ$ memiliki intensitas relatif tertinggi ($I/I_0 = 1000$), yang menunjukkan bahwa kuarsa merupakan fase mineral dengan kontribusi terbesar terhadap pola difraksi sampel. Tingginya intensitas puncak tersebut sejalan dengan hasil identifikasi pada Tabel 4.2 dan semakin memperkuat bahwa kuarsa merupakan fase mineral dominan dalam sedimen dasar Sungai Deli.

Sementara itu, puncak-puncak yang diatribusikan pada fase hasil pencocokan $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ memiliki intensitas relatif yang lebih rendah dan jumlah puncak yang lebih sedikit dibandingkan kuarsa. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa fase hasil pencocokan kedua memberikan kontribusi yang lebih kecil terhadap pola difraksi sampel sehingga tingkat keyakinan identifikasinya juga lebih rendah. Oleh karena itu, diagram intensitas relatif tidak hanya menggambarkan distribusi kekuatan puncak difraksi, tetapi juga mendukung interpretasi bahwa kuarsa merupakan fase mineral dominan, sedangkan fase hasil pencocokan kedua masih memerlukan verifikasi lebih lanjut.

4.1.2 Komposisi Fase Mineral Sedimen Dasar Sungai Deli

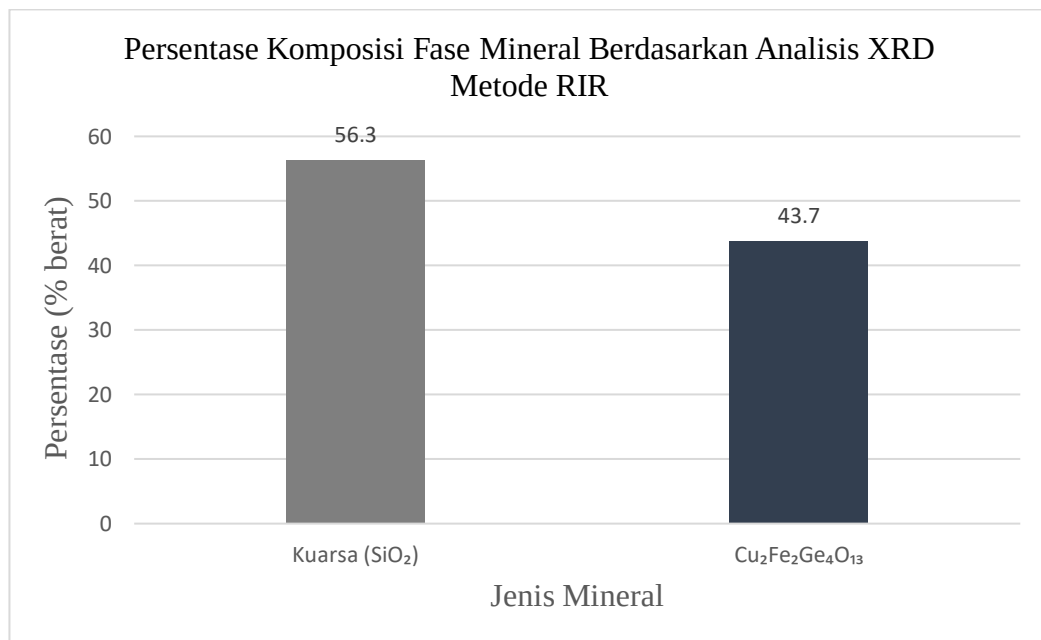
Komposisi fase mineral sedimen dasar Sungai Deli pada Titik T2 diperoleh melalui proses identifikasi fase menggunakan perangkat lunak *Match! Phase Analysis* berbasis basis data COD-Inorganic. Hasil identifikasi menunjukkan bahwa sampel sedimen didominasi oleh mineral kuarsa (SiO_2), sedangkan fase kedua merupakan hasil pencocokan terhadap senyawa $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ dengan tingkat kecocokan yang lebih rendah. Selain kedua fase tersebut, masih terdapat sebagian area puncak difraksi yang belum dapat diidentifikasi sehingga menunjukkan bahwa tidak seluruh pola difraksi dapat dicocokkan dengan data referensi yang tersedia.

Dominasi fase kuarsa menunjukkan bahwa mineral silikat merupakan penyusun utama sedimen dasar Sungai Deli pada lokasi penelitian. Sementara itu, fase hasil pencocokan kedua perlu dipahami sebagai hasil identifikasi awal berdasarkan kemiripan pola difraksi dan belum dapat diinterpretasikan sebagai keberadaan mineral alami secara pasti. Oleh karena itu, hasil komposisi fase mineral pada penelitian ini lebih mencerminkan hasil identifikasi kristalografi dibandingkan komposisi kimia unsur penyusun sedimen.

Selain fase yang berhasil diidentifikasi, terdapat sekitar 16,3% area puncak difraksi yang belum dapat dicocokkan dengan fase mineral pada basis data yang digunakan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa sampel sedimen kemungkinan masih mengandung fase mineral lain yang tidak teridentifikasi atau mengalami tumpang-tindih (*overlap*) antar puncak difraksi. Oleh karena itu, hasil identifikasi fase mineral pada penelitian ini dipandang sebagai interpretasi awal

yang masih dapat dikembangkan melalui analisis komplementer menggunakan metode lain.

Berdasarkan hasil tersebut, komposisi fase mineral memberikan gambaran awal mengenai karakteristik mineralogi sedimen dasar Sungai Deli. Pembahasan mengenai karakteristik masing-masing fase mineral hasil identifikasi disajikan secara lebih rinci pada Subbab 4.2, sedangkan keterbatasan interpretasi terhadap fase hasil pencocokan dibahas pada Subbab 4.3.



Gambar 4.3: Diagram Persentase Fase Mineral Sedimen (Metode RIR)

Gambar 4.3 menunjukkan persentase fase mineral yang teridentifikasi pada sampel sedimen dasar Sungai Deli menggunakan metode *Reference Intensity Ratio* (RIR). Berdasarkan hasil identifikasi, mineral kuarsa (SiO_2) memiliki persentase komposisi tertinggi sehingga merupakan fase mineral dominan dalam sampel. Selain kuarsa, teridentifikasi pula fase hasil pencocokan terhadap senyawa $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ dengan persentase yang lebih rendah.

Sementara itu, fase hasil pencocokan kedua hanya merepresentasikan hasil identifikasi berdasarkan kemiripan pola difraksi sehingga interpretasinya perlu dilakukan secara hati-hati. Dengan demikian, diagram persentase fase mineral memberikan gambaran mengenai distribusi relatif fase-fase yang berhasil

diidentifikasi melalui analisis XRD. Hasil komposisi fase mineral ini selanjutnya menjadi dasar untuk membahas karakteristik masing-masing fase mineral serta keterbatasan interpretasi hasil identifikasi pada subbab berikutnya.

4.2 Karakteristik Fase Mineral Sedimen Dasar Sungai Deli

Berdasarkan hasil identifikasi XRD pada Subbab 4.1, sedimen dasar Sungai Deli di Titik T2 didominasi oleh fase kuarsa (SiO_2) disertai satu fase hasil pencocokan yang masih memerlukan verifikasi lebih lanjut. Setiap fase mineral memiliki karakteristik kristalografi, sifat fisik, dan tingkat stabilitas yang berbeda sehingga dapat memberikan informasi mengenai penyusun sedimen, proses pelapukan, serta kondisi geologi daerah penelitian. Oleh karena itu, pada subbab ini dibahas karakteristik masing-masing fase mineral berdasarkan hasil identifikasi XRD yang didukung oleh kajian literatur sebagai dasar untuk menginterpretasikan kondisi mineralogi sedimen dasar Sungai Deli.

4.2.1 Karakteristik Mineral Kuarsa (SiO_2)

Mineral kuarsa (SiO_2) merupakan fase mineral dominan yang teridentifikasi pada sampel sedimen dasar Sungai Deli dengan estimasi komposisi sebesar 56,3% berdasarkan hasil analisis XRD menggunakan metode *Reference Intensity Ratio* (RIR). Kuarsa termasuk ke dalam kelompok mineral silikat yang memiliki stabilitas kimia tinggi serta ketahanan terhadap proses pelapukan fisik maupun kimia, sehingga umum dijumpai sebagai penyusun utama sedimen sungai.

Dominasi kuarsa pada sampel sedimen menunjukkan bahwa mineral silikat merupakan penyusun utama sedimen dasar Sungai Deli di lokasi penelitian. Karakteristik ini mengindikasikan bahwa selama proses transportasi dan pengendapan, kuarsa tetap bertahan sebagai fase mineral yang stabil sehingga memberikan kontribusi terbesar terhadap komposisi mineral sedimen.

Secara umum, kuarsa memiliki sifat permukaan yang relatif inert sehingga kemampuan adsorpsinya terhadap unsur logam berat lebih rendah dibandingkan mineral lempung maupun oksida logam. Meskipun demikian, keberadaan kuarsa tetap berperan sebagai matriks utama sedimen yang menjadi media pembawa

partikel-partikel mineral lain yang berpotensi mengandung unsur logam selama proses transportasi sedimen.

4.2.2 Karakteristik Fase Hasil Identifikasi Kedua

Selain fase kuarsa, hasil analisis X-Ray Diffraction (XRD) menunjukkan adanya satu fase hasil pencocokan yang memiliki kemiripan dengan senyawa $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ berdasarkan proses *search-match* menggunakan perangkat lunak Match! Phase Analysis berbasis basis data COD-Inorganic. Dibandingkan dengan fase kuarsa, fase ini memiliki tingkat kecocokan yang lebih rendah sehingga hasil identifikasinya masih bersifat tentatif. Oleh karena itu, fase tersebut belum dapat dipastikan sebagai mineral alami yang terdapat dalam sedimen dasar Sungai Deli.

Dalam berbagai literatur, $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ lebih banyak dilaporkan sebagai senyawa kristalin hasil sintesis dibandingkan sebagai mineral yang terbentuk secara alami. Oleh karena itu, kemunculan fase tersebut pada hasil identifikasi XRD lebih tepat diinterpretasikan sebagai kemiripan pola difraksi terhadap data referensi dalam basis data COD-Inorganic, bukan sebagai bukti langsung keberadaan senyawa tersebut pada sampel sedimen.

Ketidakpastian identifikasi tersebut dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain kualitas pola difraksi, kemungkinan terjadinya *peak overlap* antar puncak, serta keterbatasan basis data referensi yang digunakan dalam proses *search-match*. Kondisi tersebut memungkinkan satu pola difraksi memiliki tingkat kemiripan dengan lebih dari satu fase kristalin sehingga hasil identifikasi tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan satu puncak difraksi, melainkan harus mempertimbangkan keseluruhan pola difraksi yang terbentuk.

Berdasarkan kondisi tersebut, fase hasil pencocokan terhadap $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ pada penelitian ini diperlakukan sebagai hasil identifikasi awal dan digunakan sebagai dasar interpretasi karakteristik mineral sedimen. Konfirmasi mengenai keberadaan fase tersebut maupun unsur-unsur penyusunnya masih memerlukan analisis komplementer, seperti *X-Ray Fluorescence (XRF)* atau *Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (SEM-EDS)*. Oleh karena itu, pembahasan mengenai kemungkinan keterkaitan fase hasil pencocokan dengan keberadaan unsur logam pada sedimen disajikan pada subbab berikutnya.

4.3 Interpretasi Keberadaan Germanium (Ge) dalam Sedimen Sungai Deli

Keberadaan unsur germanium (Ge) dalam penelitian ini diinterpretasikan berdasarkan hasil identifikasi fase hasil pencocokan terhadap senyawa $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ melalui analisis X-Ray Diffraction (XRD). Hasil identifikasi tersebut diperoleh melalui proses *search-match* menggunakan perangkat lunak Match! Phase Analysis berbasis basis data COD-Inorganic. Namun, karena senyawa $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ dalam literatur kristalografi lebih dikenal sebagai senyawa sintesis, hasil pencocokan tersebut belum dapat dijadikan bukti bahwa senyawa tersebut benar-benar terdapat sebagai mineral alami dalam sedimen dasar Sungai Deli. Oleh karena itu, keberadaan unsur germanium pada penelitian ini diinterpretasikan sebagai indikasi awal yang masih memerlukan verifikasi lebih lanjut.

Secara geologi, germanium merupakan unsur jejak (*trace element*) yang dapat ditemukan dalam beberapa mineral silikat maupun mineral sulfida sebagai bagian dari proses pembentukan batuan. Unsur tersebut dapat mengalami pelapukan, tertransport bersama material sedimen dari daerah hulu, kemudian terendapkan pada lingkungan sungai. Selain berasal dari proses geologi alami, keberadaan germanium di lingkungan perairan juga berpotensi dipengaruhi oleh aktivitas antropogenik, seperti kegiatan industri, permukiman, maupun aktivitas lain di sepanjang Daerah Aliran Sungai (DAS) yang dapat melepaskan unsur logam ke lingkungan.

Meskipun demikian, analisis XRD hanya mengidentifikasi fase kristalin berdasarkan pola difraksi dan tidak mengukur kandungan maupun konsentrasi unsur secara langsung. Dengan demikian, kemunculan fase hasil pencocokan terhadap $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ tidak dapat dijadikan bukti keberadaan unsur germanium dalam sedimen, melainkan hanya menunjukkan adanya kemiripan pola difraksi terhadap senyawa referensi yang mengandung unsur tersebut. Oleh karena itu, interpretasi mengenai keberadaan germanium dalam penelitian ini masih bersifat tentatif.

Berdasarkan keterbatasan tersebut, keberadaan unsur germanium pada sedimen dasar Sungai Deli perlu dikonfirmasi menggunakan metode analisis geokimia yang mampu mengidentifikasi unsur secara langsung, seperti *X-Ray Fluorescence*

(XRF), *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES)*, atau *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS)*. Dengan demikian, hasil analisis XRD pada penelitian ini berfungsi sebagai dasar interpretasi awal mengenai kemungkinan keberadaan germanium, sedangkan kepastian keberadaan serta konsentrasi unsur tersebut memerlukan analisis lanjutan menggunakan metode analisis komplementer.

4.4 Keterkaitan Karakteristik Mineral Sedimen dengan Unsur Logam

Karakteristik mineral penyusun sedimen dasar Sungai Deli memberikan informasi awal mengenai hubungan antara komposisi mineral sedimen dan potensi keberadaan unsur logam. Berdasarkan hasil analisis X-Ray Diffraction (XRD), sedimen pada lokasi penelitian didominasi oleh fase kuarsa (SiO_2), sedangkan fase hasil pencocokan kedua menunjukkan kemiripan dengan senyawa $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$. Namun demikian, karena identifikasi fase tersebut masih bersifat tentatif, keberadaan unsur Cu, Fe, dan Ge dalam sedimen belum dapat dipastikan hanya berdasarkan hasil analisis XRD.

Karakteristik mineralogi sedimen berperan dalam memberikan gambaran mengenai kemungkinan keberadaan unsur-unsur tertentu yang berasosiasi dengan fase mineral penyusunnya. Meskipun kuarsa merupakan fase mineral dominan dan secara umum bersifat inert terhadap pengikatan logam, mineral tersebut berfungsi sebagai matriks utama sedimen yang menjadi media transportasi bagi partikel mineral lain yang berpotensi mengandung unsur logam. Dengan demikian, keberadaan fase mineral hasil pencocokan yang mengandung unsur Cu, Fe, dan Ge menjadi informasi awal yang dapat digunakan untuk mengarahkan analisis lebih lanjut mengenai potensi keberadaan unsur logam pada sedimen.

Selain karakteristik mineral, distribusi unsur logam dalam sedimen juga dipengaruhi oleh proses pelapukan batuan, transportasi sedimen, pengendapan, serta aktivitas antropogenik di sepanjang Daerah Aliran Sungai (DAS). Pada lokasi penelitian yang berada di segmen tikungan sungai, penurunan kecepatan aliran pada sisi dalam tikungan berpotensi meningkatkan akumulasi sedimen halus beserta mineral-mineral yang terbawa aliran sungai. Kondisi tersebut memungkinkan

terjadinya akumulasi fase mineral yang berasosiasi dengan unsur logam, meskipun keberadaannya belum dapat dipastikan melalui analisis XRD saja.

Dengan demikian, karakteristik mineralogi yang diuraikan di atas memberikan gambaran awal keterkaitan sedimen dengan unsur logam, dengan keterbatasan metode XRD sebagaimana telah dijelaskan pada Subbab 4.2.2 dan 4.3.

4.5 Keterkaitan Karakteristik Sedimen dengan Morfologi Sungai

Kondisi morfologi sungai pada lokasi pengambilan sampel berperan penting dalam memengaruhi proses transportasi, pengendapan, dan distribusi sedimen di dasar Sungai Deli. Berdasarkan dokumentasi lapangan menggunakan GPS Camera, lokasi penelitian berada pada koordinat sekitar 3,344° LU dan 98,590° BT. Secara morfologi, lokasi tersebut terletak pada segmen tikungan sungai (*river bend*), yang umumnya menunjukkan perbedaan kecepatan aliran antara sisi luar dan sisi dalam tikungan sehingga memengaruhi pola erosi dan deposisi sedimen.

Dokumentasi kondisi lapangan disajikan pada Gambar 4.4 hingga Gambar 4.6. Gambar 4.4 memperlihatkan kondisi alur sungai pada lokasi penelitian yang berada pada segmen tikungan, Gambar 4.5 menunjukkan karakteristik dasar sungai yang didominasi material sedimen berukuran relatif kasar, sedangkan Gambar 4.6 mendokumentasikan proses pengambilan sampel sedimen dasar yang selanjutnya dianalisis menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD). Dokumentasi tersebut menunjukkan bahwa sampel yang dianalisis berasal langsung dari lokasi penelitian yang telah ditentukan berdasarkan koordinat pengamatan di lapangan.

Kondisi tersebut juga berkaitan dengan karakteristik sedimen dasar yang ditemukan pada lokasi penelitian. Berdasarkan pengamatan visual pada Gambar 4.5, material penyusun dasar sungai didominasi oleh sedimen berukuran relatif kasar. Keberadaan material berukuran kasar menunjukkan bahwa lokasi penelitian masih dipengaruhi oleh energi aliran yang cukup besar, terutama pada saat debit sungai meningkat. Meskipun bagian dalam tikungan memiliki kecepatan aliran yang relatif lebih rendah dibandingkan sisi luar tikungan, energi aliran yang terdapat pada sungai tetap memungkinkan material berukuran halus untuk terangkut, sedangkan material yang lebih kasar cenderung tertahan dan terakumulasi pada dasar sungai.

Secara morfologi, proses tersebut menunjukkan adanya hubungan antara bentuk alur sungai dengan distribusi ukuran sedimen. Pada bagian luar tikungan, kecepatan aliran yang relatif lebih tinggi menyebabkan gaya geser terhadap dasar dan tebing sungai menjadi lebih besar sehingga berpotensi meningkatkan proses erosi dan pengangkutan sedimen. Sebaliknya, pada bagian dalam tikungan terjadi penurunan energi aliran yang menyebabkan kemampuan aliran dalam mengangkut material menjadi lebih rendah. Kondisi ini menyebabkan sedimen yang sebelumnya terbawa oleh aliran secara bertahap mengalami deposisi dan membentuk akumulasi material pada dasar sungai.

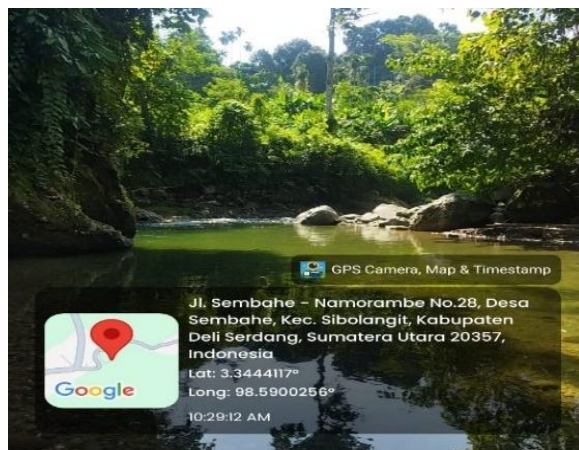
Dominasi sedimen berukuran relatif kasar pada lokasi pengambilan sampel dapat pula dikaitkan dengan proses seleksi hidrodinamika yang berlangsung secara alami. Material yang lebih halus memiliki kecenderungan lebih mudah tersuspensi dan terbawa menuju bagian sungai lainnya, sedangkan butir yang lebih kasar memerlukan energi aliran yang lebih besar untuk dapat dipindahkan. Oleh karena itu, karakteristik sedimen yang ditemukan pada lokasi penelitian tidak hanya mencerminkan sumber material sedimen, tetapi juga merupakan hasil interaksi antara ukuran butir, energi aliran, dan kondisi morfologi sungai.

Selain karakteristik ukuran butir, kondisi morfologi pada lokasi penelitian juga memiliki keterkaitan dengan komposisi mineral sedimen yang dianalisis menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD). Sedimen yang terakumulasi pada zona deposisi merupakan material yang telah mengalami proses transportasi dari bagian sungai lainnya, sehingga komposisi mineral yang teridentifikasi dapat mencerminkan material penyusun daerah tangkapan maupun material hasil pelapukan batuan yang terbawa oleh aliran. Dengan demikian, keberadaan fase mineral yang teridentifikasi pada hasil XRD dapat dipahami sebagai bagian dari proses sedimentasi yang dipengaruhi oleh kondisi hidrodinamika dan morfologi Sungai Deli.

Dokumentasi pada Gambar 4.6 memperlihatkan proses pengambilan sampel sedimen dasar secara langsung pada zona yang telah ditentukan. Pengambilan sampel pada bagian dasar sungai penting dilakukan karena material yang terakumulasi pada zona tersebut merupakan hasil akhir dari proses transportasi dan deposisi sedimen yang berlangsung pada saat pengamatan. Sampel tersebut

kemudian digunakan untuk mengetahui karakteristik mineral penyusunnya melalui analisis XRD, sehingga hubungan antara kondisi morfologi sungai dan karakteristik mineral sedimen dapat dianalisis secara lebih lanjut.

Berdasarkan uraian tersebut, dapat diketahui bahwa morfologi sungai memiliki peranan terhadap karakteristik sedimen yang terakumulasi pada lokasi penelitian. Segmen tikungan menyebabkan adanya variasi kecepatan aliran antara sisi luar dan sisi dalam tikungan, yang selanjutnya memengaruhi proses erosi, transportasi, dan deposisi. Kondisi tersebut pada akhirnya berpengaruh terhadap karakteristik material sedimen yang terdapat pada dasar sungai, baik dari segi ukuran butir maupun komposisi mineralnya. Oleh karena itu, hasil analisis XRD dalam penelitian ini tidak dapat dipisahkan dari kondisi geomorfologi dan hidrodinamika lokasi pengambilan sampel.



Gambar 4.4: Kondisi Alur Sungai pada Lokasi Pengambilan Sampel

Berdasarkan Gambar 4.4, lokasi penelitian berada pada bagian dalam tikungan sungai yang secara hidrodinamika merupakan zona dengan kecepatan aliran relatif lebih rendah dibandingkan sisi luar tikungan. Kondisi tersebut mendukung terjadinya proses deposisi karena material sedimen yang terbawa aliran sungai cenderung mengalami pengendapan pada bagian ini. Akumulasi sedimen pada zona deposisi memungkinkan berbagai ukuran butir sedimen terkumpul sebelum mengalami pengendapan lebih lanjut.



Gambar 4.5: Kondisi Dasar Sungai pada Lokasi Pengambilan Sampel

Gambar 4.5 menunjukkan bahwa dasar sungai didominasi oleh material sedimen berukuran kerikil hingga bongkah. Karakteristik tersebut mengindikasikan bahwa sedimen berasal dari material hasil pelapukan batuan yang telah mengalami transportasi melalui aliran sungai. Keberadaan material berukuran relatif kasar menunjukkan bahwa lokasi penelitian masih dipengaruhi oleh energi aliran yang cukup untuk mengangkut sedimen berukuran besar sebelum akhirnya terendapkan pada segmen tikungan Sungai.



Gambar 4.6: Dokumentasi Sampel Sedimen Sungai Deli

Gambar 4.6 memperlihatkan proses pengambilan sampel sedimen dasar yang dilakukan secara langsung pada lokasi penelitian. Pengambilan sampel dilakukan pada zona deposisi sehingga material yang diperoleh diharapkan mewakili karakteristik sedimen yang terakumulasi pada lokasi tersebut. Sampel inilah yang

selanjutnya dianalisis menggunakan metode XRD untuk mengidentifikasi fase mineral penyusun sedimen.

Hasil observasi morfologi sungai menunjukkan bahwa kondisi hidrodinamika pada segmen tikungan berpengaruh terhadap proses pengendapan sedimen di lokasi penelitian. Kondisi tersebut sejalan dengan hasil analisis XRD yang menunjukkan dominasi fase kuarsa (SiO_2), yang mengindikasikan bahwa material hasil pelapukan batuan telah mengalami transportasi dan terakumulasi pada zona deposisi. Dengan demikian, morfologi sungai berperan dalam mengendalikan proses akumulasi sedimen, sedangkan analisis mineralogi memberikan informasi mengenai karakteristik material yang terendapkan pada lokasi penelitian.

4.6 Perbandingan Hasil Penelitian dengan Penelitian Terdahulu

Hasil analisis X-Ray Diffraction (XRD) menunjukkan bahwa fase kuarsa (SiO_2) merupakan fase mineral dominan pada sedimen dasar Sungai Deli dengan persentase sebesar 56,3%. Dominasi kuarsa tersebut menunjukkan bahwa sedimen pada lokasi penelitian didominasi oleh mineral silikat yang memiliki stabilitas tinggi terhadap proses pelapukan dan transportasi. Karakteristik tersebut sesuai dengan karakteristik umum sedimen fluvial yang umumnya didominasi oleh mineral kuarsa sebagai hasil pelapukan batuan di daerah hulu Daerah Aliran Sungai (DAS).

Temuan tersebut konsisten dengan penelitian (Mostafa dkk., 2025) pada sedimen Sungai Brahmaputra–Jamuna yang melaporkan kuarsa sebagai fase mineral dominan dengan puncak difraksi utama pada sekitar $2\theta \approx 26^\circ$, yang merupakan karakteristik khas mineral kuarsa. Kesamaan hasil tersebut menunjukkan bahwa dominasi kuarsa pada sedimen Sungai Deli masih berada dalam karakteristik mineralogi yang umum dijumpai pada sedimen sungai.

Hasil penelitian ini juga memiliki kesesuaian dengan penelitian (H. Zhang dkk., 2025) pada sedimen Sungai Lhasa yang menyatakan bahwa dominasi kuarsa dipengaruhi oleh proses pelapukan batuan sumber di daerah hulu serta transportasi sedimen menuju lokasi pengendapan. Selain itu, (MAO dkk., 2025) menjelaskan bahwa kuarsa merupakan mineral yang relatif stabil sehingga tetap mendominasi sedimen fluvial selama proses transportasi dan deposisi. Dengan demikian,

dominasi kuarsa yang diperoleh pada penelitian ini mendukung hasil-hasil penelitian terdahulu mengenai karakteristik mineralogi sedimen sungai.

Berbeda dengan fase kuarsa, penelitian ini juga menghasilkan fase hasil pencocokan terhadap senyawa $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ yang mengandung unsur Cu, Fe, dan Ge. Temuan ini tidak dapat langsung dibandingkan dengan penelitian terdahulu karena fase tersebut diperoleh melalui proses *search-match* terhadap data referensi senyawa sintesis sehingga identifikasinya masih bersifat tentatif. Oleh karena itu, fase tersebut belum dapat diinterpretasikan sebagai mineral alami yang terdapat dalam sedimen dasar Sungai Deli.

Meskipun demikian, keberadaan unsur Fe dalam sedimen sungai merupakan karakteristik yang umum dijumpai sebagai hasil pelapukan batuan, sebagaimana dilaporkan oleh (Mostafa dkk., 2025). Sementara itu, (Thiele dkk., 2021) menjelaskan bahwa germanium umumnya tidak ditemukan sebagai mineral bebas, melainkan berasosiasi dengan mineral silikat maupun mineral yang mengandung Cu dan Fe. Hasil penelitian ini memiliki kemiripan dalam aspek geokimia, yaitu menunjukkan kemungkinan keterkaitan germanium dengan fase mineral tertentu, namun belum dapat membuktikan keberadaan unsur tersebut secara langsung karena metode XRD hanya mengidentifikasi fase kristalin.

Berdasarkan perbandingan tersebut, penelitian ini memperkuat temuan-temuan terdahulu bahwa kuarsa merupakan fase mineral dominan pada sedimen fluvial. Di sisi lain, kemunculan fase hasil pencocokan terhadap $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ menjadi karakteristik yang membedakan penelitian ini. Namun, mengingat identifikasinya masih bersifat tentatif, diperlukan analisis geokimia lanjutan, seperti XRF, ICP-OES, atau ICP-MS, untuk mengonfirmasi keberadaan unsur Cu, Fe, dan Ge dalam sedimen dasar Sungai Deli.

4.7 Potensi Pemanfaatan Kuarsa (SiO_2) dalam Berbagai Bidang

Dominasi mineral kuarsa (SiO_2) sebesar 56,3% pada sedimen dasar Sungai Deli menunjukkan bahwa kuarsa merupakan salah satu fase mineral utama yang menyusun material sedimen pada lokasi penelitian. Keberadaan kuarsa dalam jumlah dominan menunjukkan bahwa material sedimen yang terakumulasi pada lokasi penelitian memiliki kandungan mineral silikat yang cukup besar. Kondisi

tersebut menarik untuk dikaji lebih lanjut karena kuarsa dan material yang kaya akan silika memiliki berbagai macam pemanfaatan dalam bidang industri, mulai dari industri konstruksi hingga industri dengan kebutuhan bahan baku berkualitas tinggi.

Kuarsa merupakan salah satu mineral yang banyak ditemukan pada batuan penyusun kerak bumi dan memiliki sifat fisik maupun kimia yang mendukung penggunaannya sebagai bahan baku industri. Sifatnya yang relatif stabil, keras, tahan terhadap panas, serta memiliki kandungan SiO_2 yang tinggi menjadikan kuarsa memiliki nilai guna yang luas. Namun demikian, potensi pemanfaatan suatu material yang mengandung kuarsa tidak hanya ditentukan oleh persentase kuarsa hasil analisis mineralogi. Faktor lain seperti tingkat kemurnian, ukuran dan bentuk butir, kadar pengotor, warna material, distribusi ukuran butir, serta karakteristik fisik dan kimianya juga perlu dipertimbangkan.

Oleh karena itu, persentase kuarsa sebesar 56,3% pada penelitian ini lebih tepat dipandang sebagai indikasi awal mengenai keberadaan material kaya silika yang berpotensi untuk dikaji lebih lanjut. Hasil tersebut belum dapat secara langsung digunakan untuk menentukan bahwa sedimen Sungai Deli telah memenuhi spesifikasi sebagai bahan baku industri tertentu. Diperlukan analisis lanjutan untuk mengetahui kualitas dan tingkat kemurnian material sebelum diarahkan pada pemanfaatan dengan nilai ekonomi yang lebih tinggi.

4.7.1 Potensi Pemanfaatan Kuarsa di Masa Mendatang

Kuarsa dan pasir silika telah lama dimanfaatkan sebagai bahan baku dalam berbagai bidang industri. Pemanfaatan tersebut antara lain mencakup industri kaca dan gelas, semen, keramik dan tegel, bata tahan api, serta sebagai bahan tambahan dalam industri karet, cat, dan beton pracetak. Pada industri konstruksi, material yang mengandung silika dapat dimanfaatkan karena sifatnya yang keras dan relatif tahan terhadap abrasi. Sementara itu, pada industri kaca, kandungan silika menjadi salah satu komponen penting dalam pembentukan struktur kaca.

Selain pemanfaatan pada industri konvensional, perkembangan teknologi juga menyebabkan kebutuhan terhadap material silika dengan kualitas tertentu semakin meningkat. Kuarsa dengan tingkat kemurnian tinggi dapat digunakan sebagai bahan

baku untuk menghasilkan silikon dan berbagai produk turunannya yang digunakan dalam industri elektronika dan teknologi energi. Material berbasis silikon memiliki peranan penting dalam pembuatan komponen semikonduktor, perangkat elektronik, serta sel surya. Dengan meningkatnya kebutuhan terhadap perangkat elektronik dan pengembangan energi terbarukan, kebutuhan terhadap bahan baku berbasis silika berpotensi terus mengalami perkembangan (Arif dkk., 2025).

Kuarsa juga dapat dimanfaatkan dalam sistem filtrasi air sebagai media penyaring. Ukuran butir dan karakteristik fisik material menjadi faktor penting dalam menentukan efektivitas penggunaannya sebagai media filtrasi. Dalam aplikasi tersebut, material silika umumnya berfungsi sebagai media penyaring secara fisik, sehingga penggunaannya berbeda dengan mineral yang memiliki kemampuan adsorpsi tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa karakteristik kuarsa memungkinkan mineral tersebut digunakan untuk berbagai kebutuhan, tetapi jenis pemanfaatannya harus disesuaikan dengan sifat dan kualitas material yang tersedia.

Indonesia sendiri memiliki potensi sumber daya pasir kuarsa yang cukup besar, antara lain di wilayah Bangka Belitung, Jawa, dan Kalimantan (Angelia Verdianti Rizky Gunawan dkk., 2025) Kondisi tersebut menunjukkan bahwa material kaya silika memiliki prospek untuk dikembangkan sebagai salah satu bahan baku mineral industri. Dalam konteks penelitian ini, dominasi kuarsa sebesar 56,3% pada sedimen dasar Sungai Deli dapat menjadi dasar awal untuk melakukan penelitian lanjutan mengenai karakteristik material silika di wilayah tersebut. Akan tetapi, keberadaan kuarsa pada satu lokasi pengambilan sampel belum dapat digunakan untuk menggambarkan keseluruhan potensi sumber daya kuarsa di sepanjang Sungai Deli.

Dengan demikian, pemanfaatan sedimen yang mengandung kuarsa pada masa mendatang perlu diawali dengan pemetaan sebaran material dan pengambilan sampel pada beberapa lokasi. Data tersebut diperlukan untuk mengetahui apakah dominasi kuarsa bersifat lokal atau memiliki pola persebaran yang lebih luas. Apabila hasil penelitian lanjutan menunjukkan karakteristik yang konsisten dan memenuhi persyaratan teknis tertentu, material tersebut dapat dipertimbangkan untuk dikaji lebih lanjut sebagai bahan baku mineral industri.

4.7.2 Karakteristik dan Keunggulan Kuarsa sebagai Bahan Baku

Kuarsa memiliki beberapa karakteristik yang menjadikannya mineral penting dalam berbagai kegiatan industri. Salah satu keunggulan utama kuarsa adalah kandungan silika yang tinggi serta sifatnya yang relatif stabil secara kimia. Kuarsa juga memiliki tingkat kekerasan 7 pada skala Mohs, sehingga relatif tahan terhadap goresan dan abrasi. Karakteristik tersebut menyebabkan kuarsa sesuai untuk berbagai aplikasi yang membutuhkan material dengan ketahanan fisik yang baik.

Selain memiliki kekerasan yang tinggi, kuarsa juga memiliki ketahanan terhadap panas yang relatif baik. Sifat tersebut menjadi salah satu alasan material yang kaya silika dapat digunakan dalam pembuatan bahan tahan panas maupun produk refraktori tertentu. Stabilitas kimia kuarsa juga memungkinkan mineral ini bertahan dalam berbagai kondisi lingkungan sehingga dapat ditemukan dalam jumlah relatif besar pada endapan sedimen. Ketahanan tersebut juga menyebabkan kuarsa sering menjadi salah satu mineral yang dominan pada material sedimen hasil proses pelapukan dan transportasi.

Keunggulan lainnya adalah sifat kuarsa yang relatif inert. Kuarsa tidak mudah mengalami reaksi kimia dalam kondisi lingkungan normal dan memiliki kelarutan yang rendah dalam air. Karakteristik ini memungkinkan kuarsa bertahan selama proses pelapukan, transportasi, dan pengendapan. Dalam sistem sungai, sifat tersebut juga berperan dalam menyebabkan butiran kuarsa dapat terbawa dari sumber batuan asal dan kemudian terakumulasi pada lokasi tertentu sesuai dengan kondisi hidrodinamika sungai.

Dari sisi pemanfaatan, kuarsa memiliki rentang penggunaan yang cukup luas. Material dengan kualitas dan kemurnian yang lebih rendah dapat diarahkan untuk kebutuhan konstruksi dan industri umum, sedangkan material dengan kemurnian lebih tinggi memiliki peluang untuk digunakan pada aplikasi yang membutuhkan spesifikasi lebih ketat. Dengan demikian, nilai ekonomi kuarsa tidak hanya ditentukan oleh jumlah material yang tersedia, tetapi juga oleh kualitas dan tingkat kemurniannya (A. N. Putri dkk., 2021).

Berdasarkan hasil penelitian ini, keberadaan kuarsa sebesar 56,3% menunjukkan bahwa mineral tersebut merupakan komponen utama pada sampel sedimen yang dianalisis. Kondisi ini memberikan informasi awal mengenai

karakter mineralogi sedimen dasar Sungai Deli. Namun, untuk menentukan tingkat kelayakan pemanfaatannya, diperlukan pengujian tambahan, khususnya untuk mengetahui kandungan SiO_2 secara kimia serta keberadaan unsur pengotor seperti Fe, Al, Ti, dan unsur lainnya. Hasil pengujian tersebut nantinya dapat digunakan untuk menentukan jenis pemanfaatan yang paling sesuai dengan karakteristik material.

4.7.3 Keterbatasan dan Tantangan Pemanfaatan Kuarsa

Di samping berbagai keunggulannya, pemanfaatan kuarsa juga memiliki sejumlah keterbatasan dan tantangan yang perlu diperhatikan. Salah satunya adalah bahwa keberadaan kuarsa dalam jumlah tinggi tidak selalu menunjukkan bahwa material tersebut memiliki kualitas yang sesuai untuk seluruh kebutuhan industri. Setiap bidang pemanfaatan memiliki persyaratan bahan baku yang berbeda. Industri kaca, misalnya, memerlukan material dengan kadar silika yang tinggi dan kadar pengotor tertentu yang rendah. Demikian pula industri semikonduktor dan aplikasi teknologi tinggi memerlukan bahan baku dengan tingkat kemurnian yang jauh lebih ketat.

Sebagaimana telah diuraikan pada Subbab 4.2.1, sifat permukaan kuarsa yang relatif inert menyebabkan kemampuan adsorpsinya terhadap unsur logam berat relatif rendah. Oleh karena itu, kuarsa tidak dapat disamakan dengan mineral lempung atau oksida logam yang memiliki situs aktif lebih banyak untuk mengikat unsur tertentu. Meskipun demikian, butiran kuarsa tetap dapat menjadi bagian dari matriks sedimen dan dapat hadir bersama mineral lain yang memiliki kemampuan adsorpsi lebih besar. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa peranan kuarsa dalam lingkungan sedimen tidak hanya berkaitan dengan sifat kimianya, tetapi juga dengan keberadaannya sebagai penyusun utama material dasar sungai.

Tantangan berikutnya berkaitan dengan proses pemurnian. Material sedimen alami umumnya tidak hanya tersusun atas satu jenis mineral, tetapi merupakan campuran berbagai mineral dengan ukuran dan karakteristik yang berbeda. Oleh sebab itu, apabila sedimen Sungai Deli hendak diarahkan untuk menghasilkan bahan baku silika dengan kualitas lebih tinggi, diperlukan proses pengolahan untuk memisahkan kuarsa dari mineral pengotor. Proses tersebut dapat meliputi

pencucian, pengayakan, pemisahan berdasarkan ukuran atau sifat fisik tertentu, serta metode pemurnian lainnya sesuai dengan karakteristik material. Semakin tinggi spesifikasi kemurnian yang ditargetkan, semakin besar pula kebutuhan terhadap proses pengolahan dan pengendalian kualitas.

Selain aspek teknis, aspek kesehatan dan keselamatan kerja juga perlu diperhatikan dalam pemanfaatan material yang mengandung silika. Paparan debu silika kristalin dalam jangka panjang, terutama pada kegiatan yang menghasilkan debu halus seperti pemecahan, pemotongan, penggerusan, dan pengolahan material, dapat menimbulkan risiko kesehatan bagi pekerja apabila tidak dikendalikan dengan baik. Oleh karena itu, kegiatan pengolahan material silika perlu disertai dengan sistem pengendalian debu, penggunaan alat pelindung diri, serta penerapan prosedur keselamatan dan kesehatan kerja yang sesuai (A. Putri dkk., 2021).

Pemanfaatan sedimen sungai sebagai sumber bahan baku juga memiliki tantangan dari sisi lingkungan. Pengambilan sedimen dalam jumlah besar dapat mengubah kondisi dasar dan morfologi sungai apabila dilakukan tanpa mempertimbangkan keseimbangan sedimentasi. Perubahan tersebut berpotensi memengaruhi pola aliran, kestabilan dasar sungai, serta kondisi habitat organisme perairan. Oleh karena itu, pemanfaatan sedimen Sungai Deli tidak dapat hanya mempertimbangkan nilai ekonominya, tetapi juga harus memperhatikan keberlanjutan kondisi sungai dan lingkungan di sekitarnya.

Berdasarkan berbagai pertimbangan tersebut, hasil identifikasi kuarsa sebesar 56,3% pada sedimen dasar Sungai Deli menunjukkan adanya potensi awal untuk dikaji sebagai material yang mengandung silika. Namun, hasil tersebut belum dapat dijadikan dasar untuk menyatakan bahwa sedimen telah memenuhi standar bahan baku industri. Diperlukan penelitian lanjutan meliputi analisis kadar SiO_2 dan unsur pengotor, ukuran butir, karakteristik fisik, serta persebaran kuarsa pada beberapa lokasi. Selain itu, perlu dipertimbangkan pula kondisi lingkungan dan dampak pengambilan sedimen terhadap morfologi sungai. Dengan demikian, pemanfaatan kuarsa dari sedimen Sungai Deli perlu disesuaikan dengan karakteristik material, kebutuhan industri, dan aspek lingkungan agar dapat dilakukan secara tepat dan berkelanjutan.

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan terhadap sedimen dasar Sungai Deli menggunakan metode X-Ray Diffraction (XRD), diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Karakteristik mineral sedimen dasar Sungai Deli pada lokasi penelitian menunjukkan bahwa fase mineral yang dominan adalah kuarsa (SiO_2) dengan estimasi komposisi sebesar 56,3% berdasarkan metode *Reference Intensity Ratio* (RIR). Selain kuarsa, teridentifikasi satu fase hasil pencocokan yang memiliki kemiripan dengan senyawa $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$, namun identifikasi tersebut masih bersifat tentatif karena diperoleh melalui proses *search-match* dan belum dapat dipastikan sebagai mineral alami dalam sedimen. Dominasi kuarsa menunjukkan bahwa sedimen pada lokasi penelitian didominasi oleh mineral silikat yang stabil terhadap proses pelapukan dan transportasi fluvial.
2. Karakteristik mineral sedimen memberikan informasi awal mengenai potensi keterkaitan dengan keberadaan unsur logam. Fase hasil pencocokan yang memiliki kemiripan dengan senyawa $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ mengindikasikan kemungkinan keterkaitan dengan unsur Cu, Fe, dan Ge, namun hasil tersebut belum dapat dijadikan bukti keberadaan unsur-unsur tersebut karena metode XRD hanya mengidentifikasi fase kristalin dan tidak mengukur kandungan unsur secara langsung. Oleh karena itu, konfirmasi mengenai keberadaan maupun konsentrasi unsur logam pada sedimen dasar Sungai Deli masih memerlukan analisis geokimia menggunakan metode seperti XRF, ICP-OES, atau ICP-MS.

5.2 Saran

1. Penelitian selanjutnya disarankan melakukan pengambilan sampel sedimen pada beberapa titik sepanjang aliran Sungai Deli, baik pada bagian hulu, tengah, maupun hilir, serta pada beberapa bagian penampang sungai seperti bagian dalam dan luar tikungan serta tengah alur sungai. Pengambilan sampel pada lokasi yang lebih beragam dapat memberikan gambaran distribusi spasial komposisi mineral sedimen dan pengaruh kondisi hidrodinamika terhadap karakteristik sedimen. Selain itu, analisis ukuran butir (*grain size analysis*) dan analisis mineralogi lanjutan menggunakan metode *Rietveld refinement* pada data XRD disarankan untuk memperoleh informasi yang lebih akurat mengenai karakteristik tekstur dan fase mineral penyusun sedimen dasar Sungai Deli.
2. Penelitian lanjutan disarankan melakukan analisis kuantitatif unsur logam menggunakan metode Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) atau Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) untuk mengonfirmasi keberadaan dan konsentrasi unsur Cu dan Fe serta memverifikasi keberadaan unsur jejak Ge dalam sedimen dasar Sungai Deli. Analisis tersebut juga dapat digunakan untuk mengidentifikasi unsur logam lain, seperti Pb, Zn, dan Mn, yang tidak dapat terdeteksi secara langsung melalui analisis XRD. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi data awal bagi pemerintah daerah, instansi terkait, perguruan tinggi, dan masyarakat dalam mendukung pemantauan serta pengelolaan kualitas sedimen dan lingkungan Sungai Deli secara berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

- Amardika, Rahmaniah, & Said L, M. (2025). Karakteristik Mineralogi Sedimen Banjir Bandang di Sungai Masamba Menggunakan Metode X-Ray Diffraction (XRD). *JPF (Jurnal Pendidikan Fisika) Universitas Islam Negeri Alauddin Makassar*, 13(1), 98–105. <https://doi.org/10.24252/jpf.v13i1.56017>
- Angelia Verdianti Rizky Gunawan, Yunanto Budi Prasetyo, Andre Olihta Berutu, Muhammad Aliga Qudaifi, Salfira Salsabila, & Anastasia Dewi Titisari. (2025). Rekomendasi Pemanfaatan Pasir Kuarsa Desa Latsari, Kecamatan Bancar, Kabupaten Tuban, Jawa Timur Berdasarkan Karakteristiknya. *Forum Teknik*, 39(2).
- Arif, S., Razi, F., & Fadhli, M. (2025). Analisis Potensi Pasir Kuarsa Sebagai Bahan Baku Semikonduktor Daerah Dusun Selatan dan Dusun Utara, Kabupaten Barito Selatan, Provinsi Kalimantan Tengah. *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 8(1), 34. <https://doi.org/10.14710/jgt.8.1.2025.34-41>
- Bai, H., Liu, G., Chen, D., Xing, Z., Wang, Y., & Wang, J. (2024). *Heavy Metal Pollution in Sediments of the Yu River in a Polymetallic Ore Concentration Area: Temporal – Spatial Variation, Risk Assessment, and Sources Apportionment*. 1–14.
- Chen, Y. M., Gao, J. bo, Yuan, Y. Q., Ma, J., & Yu, S. (2016). Relationship between heavy metal contents and clay mineral properties in surface sediments: Implications for metal pollution assessment. *Continental Shelf Research*, 124, 125–133. <https://doi.org/10.1016/J.CSR.2016.06.002>
- Debnath, A., Singh, P. K., & Chandra Sharma, Y. (2021a). Metallic contamination of global river sediments and latest developments for their remediation. *Journal of Environmental Management*, 298, 113378. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113378>
- Debnath, A., Singh, P. K., & Chandra Sharma, Y. (2021b). Metallic contamination of global river sediments and latest developments for their remediation. *Journal of Environmental Management*, 298, 113378. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113378>
- Dierrisska, P. H. N., Maslukah, L., Rochaddi, B., & Zainuri, M. (2024). Distribusi Logam Berat (Pb dan Cd) Sedimen di Perairan Pantai Loji Pekalongan, Jawa Tengah. *Journal of Marine Research*, 13(3), 568–576. <https://doi.org/10.14710/jmr.v13i3.45041>
- Drake, H., Kooijman, E., & Kielman-schmitt, M. (2020). Using $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ la-mc-icp-ms transects within modern and ancient calcite crystals to determine fluid flow events in deep granite fractures. *Geosciences (Switzerland)*, 10(9), 1–26. <https://doi.org/10.3390/geosciences10090345>

- Estaurina, E. L., Pramudit, N. B., Syahir, R., & Tampubolon, Y. R. (2024). Silikosis di kalangan perempuan pekerja tambang batu pasir. *Journal of Evidence-based Nursing and Public Health*, 1(1), 44–51. <https://doi.org/10.61511/jevnah.v1i1.2024.531>
- Fadlillah, L. N., Indrastuti, A. N., Azahra, A. F., & Widyastuti, M. (2022). Evaluasi Level Toksik Logam Berat pada Air, Sedimen Tersuspensi, dan Sedimen Dasar di Sungai Winongo, D.I.Yogyakarta. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 20(1), 30–36. <https://doi.org/10.14710/jil.20.1.30-36>
- Jóni, B., Ódor, É., Maric, M., Pantleon, W., & Ungár, T. (2020). Microstructure characterization in individual texture components by X-ray line profile analysis: Principles of the X-TEX method and practical application to tensile-deformed textured Ti. *Crystals*, 10(8), 1–21. <https://doi.org/10.3390/cryst10080691>
- Kim, J. (2020). *Decision-Making of LID-BMPs for Adaptive Water Management at the Boise River Watershed in a Changing Global Environment*.
- Mostafa, Md. G., Rahman, Md. A., Pownceby, M. I., Torpy, A., Alam, Md. S., Hossen, Md. N., Hayatullah, Rana, Md. S., Hossain, Md. I., Mustak, Md. H., & Rahman, Md. S. (2025). Depositional Environment and Sediment Dynamics of the Northern Brahmaputra–Jamuna River, Bangladesh: A Combined Geochemical, Mineralogical, Grain Morphology, and Statistical Analysis. Dalam *Minerals* (Vol. 15, Nomor 11, hlm. 1192). <https://doi.org/10.3390/min15111192>
- Putri, A., Marlia, A., Mar'ah, E., Suswoyo, F., Hanief, M., & Firdaus, V. (2021). Review Sistematis: Identifikasi Bahaya Paparan Debu Silika pada Pekerja Tambang. *CoMPHI Journal: Community Medicine and Public Health of Indonesia Journal*, 1, 162–169. <https://doi.org/10.37148/comphijournal.v1i3.30>
- Putri, A. N., Marlia, A., Mar'ah, E. C. F., Suswoyo, F. I. H., Hanief, M. A., & Firdaus, V. A. (2021). Review Sistematis: Identifikasi Bahaya Paparan Debu Silika pada Pekerja Tambang. *CoMPHI Journal: Community Medicine and Public Health of Indonesia Journal*, 2(1), 162–169. <https://doi.org/10.37148/comphijournal.v2i1.30>
- Siddique, A. B., Al Helal, A. S., Patindol, T. A., Lumanao, D. M., Longatang, K. J. G., Rahman, M. A., Catalvas, L. P. A., Tulin, A. B., & Shaibur, M. R. (2025). Assessment of Heavy Metal Contamination and Ecological Risk in Urban River Sediments: A Case Study from Leyte, Philippines. *Pollutants*, 5(1), 1–32. <https://doi.org/10.3390/pollutants5010007>
- Sojka, M. (2022a). *Heavy Metals in River Sediments: Contamination, Toxicity, and Source Identification — A Case Study from Poland*.

- Sojka, M. (2022b). *Heavy Metals in River Sediments: Contamination, Toxicity, and Source Identification — A Case Study from Poland*.
- Sun, X. L., Wang, Y., Xiong, H. Q., Wu, F., Lv, T. X., Fang, Y. C., & Xiang, H. (2023). The Role of Surface Functional Groups of Iron Oxide, Organic Matter, and Clay Mineral Complexes in Sediments on the Adsorption of Copper Ions. *Sustainability (Switzerland)*, 15(8). <https://doi.org/10.3390/su15086711>
- Teng, T.-Y., Huang, J.-C., Lee, T.-Y., Chen, Y.-C., Jan, M.-Y., & Liu, C.-C. (2020). Investigating Sediment Dynamics in a Landslide-Dominated Catchment by Modeling Landslide Area and Fluvial Sediment Export. *Dalam Water* (Vol. 12, Nomor 10, hlm. 2907). <https://doi.org/10.3390/w12102907>
- Thiele, S. T., Lorenz, S., Kirsch, M., Cecilia Contreras Acosta, I., Tusa, L., Herrmann, E., Möckel, R., & Gloaguen, R. (2021). Multi-scale, multi-sensor data integration for automated 3-D geological mapping. *Ore Geology Reviews*, 136, 104252. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104252>
- Tulzuhrah, F., Rafi'i, A., & Eryati, R. (2022). Kandungan Logam Berat Pada Badan Air Dan Sedimen Di Sungai Belayan Kabupaten Kutai Kartanegara Heavy Metal Content in Water and Sediment Bodies in the Belayan River, Kutai Kartanegara Regency Article Info Abstract. *Tropical Aquatic Sciences*, 1(1), 31–38.
- Wang, P., Shen, X., Qiu, S., Zhang, L., Ma, Y., & Liang, J. (2024). Clay-Based Materials for Heavy Metals Adsorption: Mechanisms, Advancements, and Future Prospects in Environmental Remediation. *Crystals*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/cryst14121046>
- Wang, Y., Zhang, P., Yang, S., Hu, C., Jin, J., & Zhang, R. (2023). *Characteristics of Large-Scale Coherent Structures on Irregularly Arranged Rough-Bed Open-Channel Flows*. (1999).
- Wibowo, asrin muhammad, Rahman, M., Mahyudin, I., & Fatmawati, D. (2022). ANALISIS LOGAM BERAT (Mn,Pb,Cu,Fe) PADA AIR DAN SEDIMEN DI PERAIRAN SUNGAI KUIN KOTA BANJARMASIN Analysis. *Enviroscienteae*, 18(2), 100–105.
- Zhang, C., Yu, Z., Zeng, G., Jiang, M., Yang, Z., Cui, F., Zhu, M., Shen, L., & Hu, L. (2014). Effects of sediment geochemical properties on heavy metal bioavailability. *Environment International*, 73, 270–281. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.08.010>

- Zhang, H., Li, T., Mao, C., Song, Z., & Rao, W. (2025). Mineralogical and Chemical Characteristics of Sediments in the Lhasa River Basin: Implications for Weathering and Sediment Transport. *Water (Switzerland)*, 17(4), 1–16. <https://doi.org/10.3390/w17040581>
- Zhang, Y., Lian, J., Li, S., Zhao, Y., Zhang, G., & Liu, Y. (2021). Predicting dam flood discharge induced ground vibration with modified frequency response function. *Water (Switzerland)*, 13(2). <https://doi.org/10.3390/w13020144>
- Zheng, L., Chen, Y., Zhou, S., Chen, Y., Wang, X., Wang, X., Zhang, L., & Chen, Z. (2020). Nitrogen removal for liquid-ammonia mercerization wastewater via partial nitrification/anammox based on zeolite sequencing batch reactor. *Water (Switzerland)*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/w12082234>

LAMPIRAN

Lampiran A *Output Match! Phase Analysis Report* Hasil Analisis XRD Sedimen Sungai Deli

Match! Phase Analysis Report

Sample: 1

Sample Data

File name	1.raw
File path	C:/Users/Ablii/Downloads
Data collected	11/28/25 09:54:14
Data range	10.130° - 90.135°
Original data range	10.000° - 90.005°
Number of points	4056
Step size	0.020
Rietveld refinement converged	No
Alpha2 subtracted	No
Background subtr.	No
Data smoothed	No
2theta correction	0.13°
Radiation	X-rays
Wavelength	1.541874 Å

Analysis Results

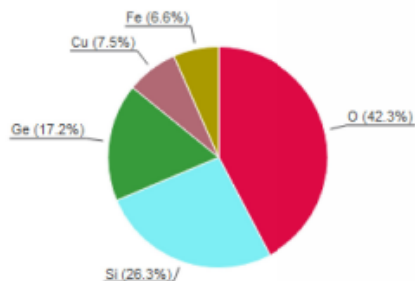
Phase composition (Weight %) calc. by RIR method



Index	Amount (%)	Name	Formula sum
A	56.3	Silicon oxide Quartz	O2 Si
B	43.7	Cu2 Fe2 (Ge4 O13)	Cu2 Fe2 Ge4 O13
	16.3	Unidentified peak area	

Amounts calculated by RIR (Reference Intensity Ratio) method

Elemental composition (Weight %) calc. by RIR method



Element	Amount (weight %)
O	42.3% (*)
Si	26.3%
Ge	17.2%
Cu	7.5%
Fe	6.6%
*LE (sum)	42.3%

Details of identified phases

A: Silicon oxide Quartz (56.3 %) *

Formula sum	O2 Si
Entry number	96-500-0036
Figure-of-Merit (FoM)	0.778005*
Total number of peaks	140
Peaks in range	140
Peaks matched	45
Intensity scale factor	0.75
2theta correction	-0.048°
Space group	P 32 2 1
Crystal system	trigonal (hexagonal axes)

Unit cell	a= 4.9124 Å c= 5.4039 Å
I/c	2.92 (Source: Unknown)
Calc. density	2.650 g/cm³
Reference	Will G, Bellotto M, Parish W, Hart M, "Crystal structures of quartz and magnesium germanate by profileanalysis of synchrotron-radiation high-resolution powder data.", Journal of Applied Crystallography 21 , 182-191 (1988)

B: Cu2 Fe2 (Ge4 O13) (43.7 %)*

Formula sum	Cu2 Fe2 Ge4 O13
Entry number	96-153-2854
Figure-of-Merit (FoM)	0.772228*
Total number of peaks	1000
Peaks in range	1000
Peaks matched	380
Intensity scale factor	0.86
2theta correction	0.016°
Space group	P 1 21/m 1
Crystal system	monoclinic
Unit cell	a= 12.1050 Å b= 8.5073 Å c= 4.8736 Å β= 96.145 °
I/c	4.32
Calc. density	4.906 g/cm³
Reference	Masuda T., Chakoumakos B.C., Nygren C.L., Imai S., Uchinokura K., "A novel germanate, Cu2 Fe2 Ge4 O13, with a four tetrahedra oligomer", Journal of Solid State Chemistry 176 , 175-179 (2003)

(*): 2theta values have been shifted internally for the calculation of the amounts, the intensity scaling factors as well as the figure of merit (FoM), due to the active search-match option 'Automatic zero point adaption'.

Candidates

Name	Formula	Entry No.	FoM
	O45 P9 V12	96-400-1392	0.7653
Tetrazink bis(arsenate(V)) oxide - HT	As2 O9 Zn4	96-200-2750	0.7568
Tetrazink bis(arsenate(V)) oxide - LT	As2 O9 Zn4	96-200-2751	0.7524
	O5 Pb1.5 Sb5 Se8 Sr4	96-724-0512	0.7452
	B3 H3 N12	96-432-2188	0.7444
Ba2 Cu (P O3)6	Ba2 Cu O18 P6	96-210-6543	0.7419
	Mo9 O26	96-153-0707	0.7365
	Mo9 O26	96-153-4891	0.7351
	As12 O18	96-451-3290	0.7337
Tungsten oxide (18/49)	O49 W18	96-100-1679	0.7327
	C12 Br6 O4	96-430-4804	0.7327
	As12 O18	96-451-3289	0.7324
	C5 K2 N8 O9	96-704-7924	0.7294
Ba2 Zn (B O3)2	B2 Ba2 O6 Zn	96-151-0696	0.7290
trilithium gallium trimolybdate	Ga Li3 Mo3 O12	96-201-6395	0.7275
	F2 Li O2 P	96-712-2838	0.7266
Petewilliamsite	As10 Co4.5 Cu0.8 Ni4.7 O35	96-901-1827	0.7256
Megakalsilita	Al K O4 Si	96-900-4686	0.7254
	Bi Cs3 O14 P4 Sr	96-704-5220	0.7243
Ag (Mo O2) P O4	Ag Mo O6 P	96-150-9466	0.7242
	O5 S Ti	96-210-0943	0.7235
W18 O49	O49 W18	96-152-8167	0.7233
Si (N C S)4	C4 N4 S4 Si	96-154-1742	0.7215
Cu2 Sc2 (Ge4 O13)	Cu2 Ge4 O13 Sc2	96-153-3048	0.7214
	C0 F8 Fe2 Nb O8 P2	96-411-4284	0.7213
La2 (Mo4 O15)	La2 Mo4 O15	96-153-5940	0.7205
W O2.72	O2.72 W	96-153-8316	0.7201
	As4 O6	96-451-3284	0.7194
Ba (H P O4)	Ba H O4 P	96-152-9103	0.7193
Li2 K0.5 (K0.5 (N H4)) (S O4)2	H4 K Li2 N C8 S2	96-153-1778	0.7193
aluminum orthophosphate	Al O4 P	96-210-4907	0.7190
Cu3Fe2(SeO3)6-II	Cu3 Fe2 O18 Se6	96-155-7192	0.7185
	H5 N O5	96-210-3553	0.7179
	Cl1.25 Ge0.5 O3.25 Pb2.88	96-433-6644	0.7178
kallophillite	Al27 K24.67 Na2.33 O108 Si27	96-155-9219	0.7173
Tellurium molybdenum oxide (1/5/16)	Mo5 O16 Te	96-100-1809	0.7164
K[N(SO2F)2]	F2 K N O4 S2	96-433-3522	0.7162
	Ga2 Mo O10 Te2	96-700-1533	0.7156
(Mo0.93 Ta0.07)5 O14	Mo4.65 O14 Ta0.35	96-210-6745	0.7153
	Bi Cs3 O14 P4 Pb	96-704-5222	0.7151
	As2 O3	96-451-3297	0.7140
Rb Nb O (S O4)2	Nb O9 Rb S2	96-154-2002	0.7139
U4 O8.938	O8.938 U4	96-231-0713	0.7138
(Mo.72 W.28)5 O14	Mo3.6 O14 W1.4	96-153-6729	0.7133
	As12 O18	96-451-3287	0.7132
Cs Cu Fe F6	Cs Cu F6 Fe	96-722-1429	0.7131

Potassium dinitramide	K N3 O4	96-411-7034	0.7118
Cs Ti Nb O4 F2	Cs F2 Nb O4 Ti	96-722-1460	0.7117
	Cr4 Cs2 O16 Pr2	96-412-7114	0.7112
Bavenite	Al1.301 Be2.701 Ca4 H2 Na0.012 O28 Si8.989	96-901-7564	0.7112
	As2 O3	96-451-3296	0.7110
	O18 Se5 Sr2 V3	96-431-7370	0.7107
and 5144 others...			

Search-Match

Settings

Reference database used	COD-Inorg 2025.12.01
Method	Peak-based search-match
Automatic zeropoint adaptation	Yes
Downgrade entries with low scaling factors	Yes
Minimum figure-of-merit (FoM)	0.60
2theta window for peak corr.	0.30 deg.
Minimum rel. int. for peak corr.	0
Parameter/influence 2theta	0.50
Parameter/influence intensities	0.50
Parameter multiple/single phase(s)	0.50

Selection Criteria

Elements:

Elements of which at least one must be present:

H, O, Na, Al, Si, P, Ca, Fe, Pb

Elements that may be present:

All elements not mentioned above

Peak List

No.	2theta [°]	d [Å]	I/I0 (peak height)	Counts (peak area)	FWHM	Matched
1	10.62	8.3338	215.35	20.63	0.1184	
2	10.64	8.3134	107.67	10.31	0.1184	
3	20.00	4.4398	80.80	18.99	0.2905	
4	20.05	4.4288	40.40	9.50	0.2905	
5	20.27	4.3806	73.59	7.02	0.1178	
6	20.32	4.3698	36.80	3.51	0.1178	B
7	20.61	4.3090	64.05	15.89	0.3066	B
8	20.66	4.2984	32.03	7.94	0.3066	
9	20.94	4.2417	225.07	18.91	0.1038	A,B
10	21.00	4.2312	112.53	9.45	0.1038	B
11	21.23	4.1842	147.85	10.51	0.0878	B
12	21.29	4.1739	73.93	5.25	0.0878	
13	21.57	4.1198	51.25	20.54	0.4953	
14	21.62	4.1096	25.63	10.27	0.4953	B
15	22.05	4.0310	375.50	49.26	0.1621	
16	22.11	4.0210	187.75	24.63	0.1621	B
17	22.87	3.8882	87.18	13.71	0.1944	
18	22.93	3.8786	43.59	6.86	0.1944	B
19	23.75	3.7470	222.31	30.62	0.1702	
20	23.81	3.7377	111.16	15.31	0.1702	
21	24.21	3.6757	78.21	7.49	0.1184	
22	24.27	3.6667	39.10	3.75	0.1184	
23	24.55	3.6268	406.55	38.94	0.1184	B
24	24.61	3.6179	203.27	19.47	0.1184	B
25	24.78	3.5926	93.23	8.93	0.1184	B
26	24.84	3.5838	46.62	4.47	0.1184	B
27	24.97	3.5663	88.44	8.47	0.1184	
28	25.03	3.5575	44.22	4.24	0.1184	
29	25.17	3.5385	95.20	9.12	0.1184	
30	25.23	3.5297	47.60	4.56	0.1184	
31	25.72	3.4640	109.37	10.48	0.1184	B
32	25.78	3.4555	54.69	5.24	0.1184	
33	26.12	3.4113	109.71	10.51	0.1184	
34	26.19	3.4029	54.85	5.25	0.1184	
35	26.48	3.3664	154.22	14.77	0.1184	
36	26.54	3.3581	77.11	7.39	0.1184	
37	26.72	3.3361	1000.00	95.79	0.1184	A
38	26.79	3.3279	500.00	47.89	0.1184	B
39	27.22	3.2768	85.29	21.79	0.3158	
40	27.28	3.2687	42.65	10.90	0.3158	B
41	27.51	3.2419	95.52	10.36	0.1340	

43	27.88	3.2001	522.17	95.57	0.2262	B
44	27.95	3.1922	261.08	47.78	0.2262	B
45	28.13	3.1718	617.18	30.28	0.0606	
46	28.21	3.1640	308.59	15.14	0.0606	B
47	28.59	3.1219	298.41	49.86	0.2065	B
48	28.67	3.1142	149.21	24.93	0.2065	
49	29.61	3.0169	138.94	21.04	0.1871	B
50	29.69	3.0094	69.47	10.52	0.1871	B
51	31.57	2.8342	152.98	12.75	0.1030	B
52	31.65	2.8273	76.49	6.37	0.1030	
53	32.00	2.7973	391.50	16.08	0.0507	
54	32.08	2.7904	195.75	8.04	0.0507	B
55	33.13	2.7042	68.34	8.88	0.1606	
56	33.21	2.6976	34.17	4.44	0.1606	B
57	33.85	2.6481	99.55	9.54	0.1184	
58	33.94	2.6416	49.77	4.77	0.1184	
59	34.56	2.5956	154.96	8.71	0.0695	B
60	34.65	2.5892	77.48	4.35	0.0695	B
61	34.97	2.5660	59.73	14.74	0.3050	B
62	35.06	2.5596	29.87	7.37	0.3050	B
63	35.65	2.5186	220.87	104.01	0.5820	
64	35.74	2.5124	110.44	52.00	0.5820	
65	36.14	2.4855	162.54	15.78	0.1200	
66	36.23	2.4794	81.27	7.89	0.1200	
67	36.64	2.4529	131.61	20.20	0.1897	A,B
68	36.73	2.4468	65.81	10.10	0.1897	B
69	37.83	2.3780	112.40	29.33	0.3225	B
70	37.93	2.3721	56.20	14.67	0.3225	B
71	38.29	2.3504	77.86	15.16	0.2406	B
72	38.39	2.3446	38.93	7.58	0.2406	B
73	38.52	2.3372	96.08	4.94	0.0635	B
74	38.62	2.3315	48.04	2.47	0.0635	B
75	38.79	2.3213	108.17	17.84	0.2038	B
76	38.89	2.3156	54.08	8.92	0.2038	B
77	39.10	2.3036	78.75	11.97	0.1878	B
78	39.21	2.2979	39.37	5.98	0.1878	
79	39.50	2.2812	113.37	18.16	0.1980	A
80	39.61	2.2756	56.68	9.08	0.1980	A,B
81	39.80	2.2651	76.04	8.84	0.1437	B
82	39.90	2.2595	38.02	4.42	0.1437	B
83	40.39	2.2333	54.40	17.22	0.3913	A,B
84	40.49	2.2278	27.20	8.61	0.3913	B
85	41.74	2.1642	76.01	17.84	0.2901	B
86	41.84	2.1589	38.01	8.92	0.2901	
87	42.25	2.1393	184.71	11.24	0.0752	B
88	42.36	2.1340	92.35	5.62	0.0752	
89	42.56	2.1242	111.77	19.12	0.2114	A,B
90	42.67	2.1190	55.88	9.56	0.2114	B
91	43.03	2.1022	89.95	13.66	0.1877	B
92	43.14	2.0970	44.98	6.83	0.1877	B
93	44.97	2.0158	103.54	14.21	0.1696	
94	45.09	2.0108	51.77	7.10	0.1696	B
95	45.32	2.0013	85.73	12.12	0.1747	B
96	45.43	1.9963	42.87	6.06	0.1747	B
97	45.64	1.9879	90.42	19.16	0.2619	B
98	45.76	1.9830	45.21	9.58	0.2619	A,B
99	47.15	1.9276	109.56	15.59	0.1758	B
100	47.27	1.9228	54.78	7.79	0.1758	B
101	48.18	1.8888	179.48	17.19	0.1184	
102	48.31	1.8841	89.74	8.60	0.1184	B
103	49.75	1.8328	110.59	13.31	0.1487	B
104	49.88	1.8282	55.29	6.65	0.1487	B
105	50.26	1.8155	172.38	31.58	0.2264	A,B
106	50.39	1.8110	86.19	15.79	0.2264	B
107	50.84	1.7961	208.66	17.16	0.1016	A,B
108	50.97	1.7916	104.33	8.58	0.1016	B
109	51.57	1.7724	102.86	7.26	0.0872	B
110	51.70	1.7680	51.43	3.63	0.0872	B
111	53.52	1.7121	94.39	17.61	0.2306	B
112	53.67	1.7079	47.19	8.80	0.2306	
113	54.92	1.6719	69.66	19.32	0.3427	A,B
114	55.07	1.6678	34.83	9.66	0.3427	A,B
115	55.68	1.6507	238.86	22.88	0.1184	A,B
116	55.83	1.6466	119.43	11.44	0.1184	B

117	57.12	1.6126	76.28	15.53	0.2517	B
118	57.27	1.6087	38.14	7.77	0.2517	A,B
119	58.23	1.5844	135.78	19.39	0.1765	B
120	58.39	1.5804	67.89	9.69	0.1765	B
121	60.03	1.5411	288.64	29.76	0.1274	A,B
122	60.20	1.5373	144.32	14.88	0.1274	A,B
123	61.79	1.5015	70.38	12.70	0.2229	B
124	61.96	1.4978	35.19	6.35	0.2229	B
125	62.23	1.4919	126.30	23.23	0.2273	B
126	62.40	1.4882	63.15	11.61	0.2273	B
127	62.61	1.4837	119.08	37.99	0.3943	B
128	62.79	1.4800	59.54	18.99	0.3943	B
129	64.04	1.4540	72.68	16.76	0.2849	A,B
130	64.22	1.4504	36.34	8.38	0.2849	A,B
131	64.82	1.4383	448.56	42.97	0.1184	B
132	65.01	1.4347	224.28	21.48	0.1184	B
133	67.33	1.3907	90.24	8.66	0.1186	B
134	67.52	1.3873	45.12	4.33	0.1186	B
135	67.80	1.3822	152.20	22.16	0.1799	A,B
136	67.99	1.3788	76.10	11.08	0.1799	A,B
137	68.19	1.3752	74.54	10.09	0.1673	A,B
138	68.39	1.3718	37.27	5.05	0.1673	A,B
139	68.46	1.3705	85.10	28.30	0.4109	A,B
140	68.66	1.3671	42.55	14.15	0.4109	B
141	69.11	1.3591	58.02	12.89	0.2745	B
142	69.31	1.3558	29.01	6.44	0.2745	B
143	69.52	1.3523	101.38	17.23	0.2100	
144	69.71	1.3489	50.69	8.61	0.2100	B
145	73.81	1.2838	92.50	20.60	0.2753	A,B
146	74.03	1.2806	46.25	10.30	0.2753	B
147	75.90	1.2536	84.65	16.76	0.2447	A,B
148	76.13	1.2505	42.33	8.38	0.2447	B
149	76.96	1.2390	70.56	16.41	0.2874	B
150	77.18	1.2359	35.28	8.20	0.2874	B
151	79.97	1.1997	93.96	16.72	0.2199	A,B
152	80.21	1.1968	46.98	8.36	0.2199	A,B
153	80.86	1.1888	134.45	12.88	0.1184	B
154	81.10	1.1858	67.22	6.44	0.1184	B
155	81.27	1.1838	159.97	15.32	0.1184	A,B
156	81.51	1.1809	79.99	7.66	0.1184	A,B

Integrated Profile Areas

Based on calculated profile

<i>Profile area</i>	<i>Counts</i>	<i>Amount</i>
Overall diffraction profile	837992	100.00%
Background radiation	657799	78.50%
Diffraction peaks	180193	21.50%
Peak area belonging to selected phases	43325	5.17%
Peak area of phase A (Silicon oxide Quartz)	13180	1.57%
Peak area of phase B (Cu ₂ Fe ₂ (Ge ₄ O ₁₃))	30145	3.60%
Unidentified peak area	136868	16.33%

Peak Residuals

<i>Peak data</i>	<i>Counts</i>	<i>Amount</i>
Overall peak intensity	2459	100.00%
Peak intensity belonging to selected phases	2135	86.84%
Unidentified peak intensity	324	13.16%

Diffraction Pattern Graphics

Unit cell	a= 4.9124 Å c= 5.4039 Å
I/Ic	2.92 (Source: Unknown)
Calc. density	2.650 g/cm ³
Reference	Will G, Bellotto M, Parish W, Hart M, "Crystal structures of quartz and magnesium germanate by profi of synchrotron-radiation high-resolution powder data.", Journal of Applied Crystallography 21 , 182-191

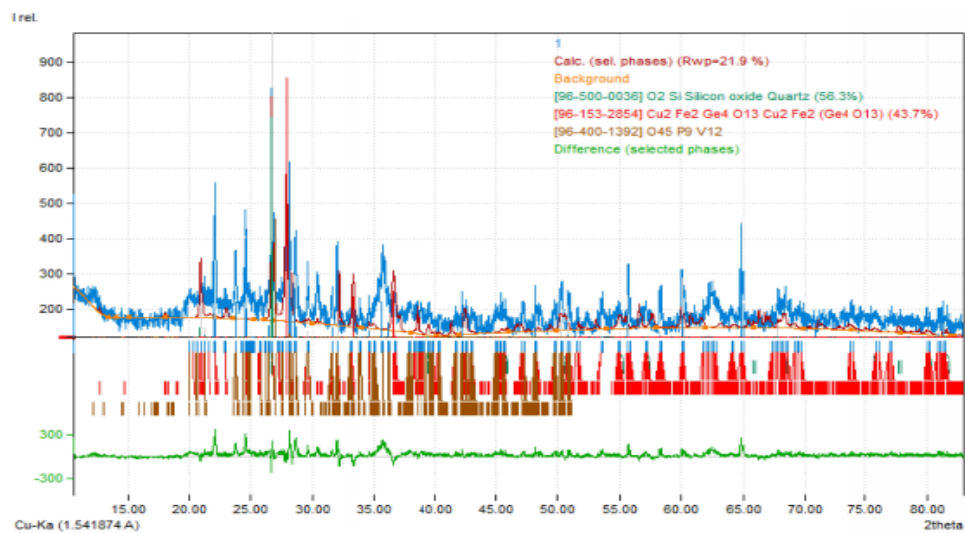
B: Cu₂ Fe₂ (Ge₄ O₁₃) (43.7 %)*

Formula sum	Cu ₂ Fe ₂ Ge ₄ O ₁₃
Entry number	96-153-2854
Figure-of-Merit (FoM)	0.772228*
Total number of peaks	1000
Peaks in range	1000
Peaks matched	380
Intensity scale factor	0.86
2theta correction	0.016°
Space group	P 1 21/m 1
Crystal system	monoclinic
Unit cell	a= 12.1050 Å b= 8.5073 Å c= 4.8736 Å β= 96.145 °
I/Ic	4.32
Calc. density	4.906 g/cm ³
Reference	Masuda T., Chakoumakos B.C., Nygren C.L., Imai S., Uchinokura K., "A novel germanate, Cu ₂ Fe ₂ G with a four tetrahedra oligomer", Journal of Solid State Chemistry 176 , 175-179 (2003)

(*)2theta values have been shifted internally for the calculation of the amounts, the intensity scaling factors as well as the figure of merit (FoM) the active search-match option 'Automatic zero point adaption'.

Candidates

Name	Formula	Entry No.	FoM
	O45 P9 V12	96-400-1392	0.7653
Tetrazink bis(arsenate(V)) oxide - HT	As ₂ O ₉ Zn ₄	96-200-2750	0.7568
Tetrazink bis(arsenate(V)) oxide - LT	As ₂ O ₉ Zn ₄	96-200-2751	0.7524
	O5 Pb1.5 Sb5 Se8 Sr4	96-724-0512	0.7452
	B3 H3 N12	96-432-2188	0.7444
Ba ₂ Cu (P O ₃) ₆	Ba ₂ Cu O18 P ₆	96-210-6543	0.7419
	Mo9 O26	96-153-0707	0.7365
	Mo9 O26	96-153-4891	0.7351
	As12 O18	96-451-3290	0.7337
Tungsten oxide (18/49)	O49 W18	96-100-1679	0.7327
	C12 Br6 O4	96-430-4804	0.7327
	As12 O18	96-451-3289	0.7324
	C5 K2 N8 O9	96-704-7924	0.7294
Ba ₂ Zn (B O ₃) ₂	B2 Ba ₂ O6 Zn	96-151-0696	0.7290
trilithium gallium trimolybdate	Ga Li3 Mo3 O12	96-201-6395	0.7275
	F2 Li O2 P	96-712-2838	0.7266
Petewilliamsite	As10 Co ₄ .5 Cu0.8 Ni4.7 O35	96-901-1827	0.7256
Magakalsite	Al K O4 Si	96-900-4686	0.7254
	Bi Cs3 O14 P4 Sr	96-704-5220	0.7243
Ag (Mo O ₂) P O ₄	Ag Mo O6 P	96-150-9466	0.7242
	O5 S Ti	96-210-0943	0.7235
W18 O49	O49 W18	96-152-8167	0.7233
Si (N C S) ₄	C4 N4 S4 Si	96-154-1742	0.7215
Cu ₂ Sc ₂ (Ge ₄ O ₁₃)	Cu ₂ Ge ₄ O13 Sc ₂	96-153-3048	0.7214
	C0 F8 Fe2 N6 O8 P2	96-411-4284	0.7213
La ₂ (Mo ₄ O ₁₅)	La ₂ Mo ₄ O15	96-153-5940	0.7205
W O ₂ .72	O2.72 W	96-153-8316	0.7201
	As4 O6	96-451-3284	0.7194
Ba (H P O ₄)	Ba H O4 P	96-152-9103	0.7193
Li ₂ K _{0.5} (K _{0.5} (N H ₄)) (S O ₄) ₂	H4 K Li ₂ N C8 S2	96-153-1778	0.7193
aluminum orthophosphate	Al O4 P	96-210-4907	0.7190
Cu ₃ Fe ₂ (SeO ₃) ₆ -II	Cu ₃ Fe ₂ O18 Se6	96-155-7192	0.7185
	H5 N O5	96-210-3553	0.7179
	Cl1.25 Ge0.5 O3.25 Pb2.88	96-433-6644	0.7178
kaliophillite	Al27 K24.67 Na2.33 O108 Si27	96-155-9219	0.7173
Tellurium molybdenum oxide (1/5/16)	Mo5 O16 Te	96-100-1809	0.7164
K[N(SO ₂ F) ₂]	F2 K N O4 S2	96-433-3522	0.7162
	Ga2 Mo O10 Te2	96-700-1533	0.7156
(Mo _{0.93} Ta _{0.07}) ₅ O ₁₄	Mo _{4.65} O14 Ta _{0.35}	96-210-6745	0.7153
	Bi Cs3 O14 P4 Pb	96-704-5222	0.7151
	As2 O3	96-451-3297	0.7140
Rb Nb O (S O ₄) ₂	Nb O9 Rb S2	96-154-2002	0.7139
U ₄ O ₈ .938	O8.938 U4	96-231-0713	0.7138
(Mo _{0.72} W _{0.28}) ₅ O ₁₄	Mo _{3.6} O14 W _{1.4}	96-153-6729	0.7133
	As12 O18	96-451-3287	0.7132
Cs Cu Fe F ₆	Cs Cu F6 Fe	96-722-1429	0.7131



Match! Copyright © 2003-2025 CRYSTAL IMPACT, Bonn, Germany

Lampiran B Data Lengkap Puncak Difraksi XRD Sedimen Sungai Deli

DAFTAR LENGKAP 156 PUNCAK DIFRAKSI XRD — SEDIMEN DASAR SUNGAI DELI

Data diolah dari hasil analisis X-Ray Diffraction menggunakan software Match! Phase Analysis

Identifikasi fase mineral berdasarkan database COD-Inorganic

Radiasi yang digunakan: Cu-K α

Panjang gelombang: $\lambda = 1.541874 \text{ \AA}$

Rentang sudut difraksi: $2\theta = 10^\circ - 90^\circ$

Metode identifikasi fase: Search-Match

Metode kuantifikasi fase: Reference Intensity Ratio (RIR)

Rietveld refinement tidak dilakukan (analisis bersifat semi-kuantitatif)

Nilai goodness-of-fit hasil pencocokan fase: $R_{wp} = 21,9\%$

Persentase puncak tidak teridentifikasi: 16,3%

Warna: Biru = Fase A (Kuarsa) Oranye = Fase B ($\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$) Hijau = A+B overlap Abu = tidak teridentifikasi				
Total Peak	Fase A	Fase B	A+B	Tidak terident.
156	45	(hitung dari kolom Matched)	(hitung dari kolom Matched)	sis
No.	2θ (°)	d (Å)	I/I ₀	Fase
1	10.62	8.3338	215.35	—
2	10.64	8.3134	107.67	—
3	20.00	4.4398	80.80	—
4	20.05	4.4288	40.40	—

5	20.27	4.3806	73.59	—
6	20.32	4.3698	36.80	B
7	20.61	4.3090	64.05	B
8	20.66	4.2984	32.03	—
9	20.94	4.2417	225.07	A,B
10	21.00	4.2312	112.53	B
11	21.23	4.1842	147.85	B
12	21.29	4.1739	73.93	—
13	21.57	4.1198	51.25	—
14	21.62	4.1096	25.63	B
15	22.05	4.0310	375.50	—
16	22.11	4.0210	187.75	B
17	22.87	3.8882	87.18	—
18	22.93	3.8786	43.59	B
19	23.75	3.7470	222.31	—
20	23.81	3.7377	111.16	—
21	24.21	3.6757	78.21	—
22	24.27	3.6667	39.10	—
23	24.55	3.6268	406.55	B
24	24.61	3.6179	203.27	B
25	24.78	3.5926	93.23	B
26	24.84	3.5838	46.62	B
27	24.97	3.5663	88.44	—
28	25.03	3.5575	44.22	—
29	25.17	3.5385	95.20	—
30	25.23	3.5297	47.60	—

31	25.72	3.4640	109.37	B
32	25.78	3.4555	54.69	—
33	26.12	3.4113	109.71	—
34	26.19	3.4029	54.85	—
35	26.48	3.3664	154.22	—
36	26.54	3.3581	77.11	—
37	26.72	3.3361	1000.00	A
38	26.79	3.3279	500.00	B
39	27.22	3.2768	85.29	—
40	27.28	3.2687	42.65	B
41	27.51	3.2419	95.52	—
42	27.58	3.2339	47.76	—
43	27.88	3.2001	522.17	B
44	27.95	3.1922	261.08	B
45	28.13	3.1718	617.18	—
46	28.21	3.1640	308.59	B
47	28.59	3.1219	298.41	B
48	28.67	3.1142	149.21	—
49	29.61	3.0169	138.94	B
50	29.69	3.0094	69.47	B
51	31.57	2.8342	152.98	B
52	31.65	2.8273	76.49	—
53	32.00	2.7973	391.50	—
54	32.08	2.7904	195.75	B
55	33.13	2.7042	68.34	—
56	33.21	2.6976	34.17	B

57	33.85	2.6481	99.55	—
58	33.94	2.6416	49.77	—
59	34.56	2.5956	154.96	B
60	34.65	2.5892	77.48	B
61	34.97	2.5660	59.73	B
62	35.06	2.5596	29.87	B
63	35.65	2.5186	220.87	—
64	35.74	2.5124	110.44	—
65	36.14	2.4855	162.54	—
66	36.23	2.4794	81.27	—
67	36.64	2.4529	131.61	A,B
68	36.73	2.4468	65.81	B
69	37.83	2.3780	112.40	B
70	37.93	2.3721	56.20	B
71	38.29	2.3504	77.86	B
72	38.39	2.3446	38.93	B
73	38.52	2.3372	96.08	B
74	38.62	2.3315	48.04	B
75	38.79	2.3213	108.17	B
76	38.89	2.3156	54.08	B
77	39.10	2.3036	78.75	B
78	39.21	2.2979	39.37	—
79	39.50	2.2812	113.37	A
80	39.61	2.2756	56.68	A,B
81	39.80	2.2651	76.04	B
82	39.90	2.2595	38.02	B

83	40.39	2.2333	54.40	A,B
84	40.49	2.2278	27.20	B
85	41.74	2.1642	76.01	B
86	41.84	2.1589	38.01	—
87	42.25	2.1393	184.71	B
88	42.36	2.1340	92.35	—
89	42.56	2.1242	111.77	A,B
90	42.67	2.1190	55.88	B
91	43.03	2.1022	89.95	B
92	43.14	2.0970	44.98	B
93	44.97	2.0158	103.54	—
94	45.09	2.0108	51.77	B
95	45.32	2.0013	85.73	B
96	45.43	1.9963	42.87	B
97	45.64	1.9879	90.42	B
98	45.76	1.9830	45.21	A,B
99	47.15	1.9276	109.56	B
100	47.27	1.9228	54.78	B
101	48.18	1.8888	179.48	—
102	48.31	1.8841	89.74	B
103	49.75	1.8328	110.59	B
104	49.88	1.8282	55.29	B
105	50.26	1.8155	172.38	A,B
106	50.39	1.8110	86.19	B
107	50.84	1.7961	208.66	A,B
108	50.97	1.7916	104.33	B

109	51.57	1.7724	102.86	B
110	51.70	1.7680	51.43	B
111	53.52	1.7121	94.39	B
112	53.67	1.7079	47.19	—
113	54.92	1.6719	69.66	A,B
114	55.07	1.6678	34.83	A,B
115	55.68	1.6507	238.86	A,B
116	55.83	1.6466	119.43	B
117	57.12	1.6126	76.28	B
118	57.27	1.6087	38.14	A,B
119	58.23	1.5844	135.78	B
120	58.39	1.5804	67.89	B
121	60.03	1.5411	288.64	A,B
122	60.20	1.5373	144.32	A,B
123	61.79	1.5015	70.38	B
124	61.96	1.4978	35.19	B
125	62.23	1.4919	126.30	B
126	62.40	1.4882	63.15	B
127	62.61	1.4837	119.08	B
128	62.79	1.4800	59.54	B
129	64.04	1.4540	72.68	A,B
130	64.22	1.4504	36.34	A,B
131	64.82	1.4383	448.56	B
132	65.01	1.4347	224.28	B
133	67.33	1.3907	90.24	B
134	67.52	1.3873	45.12	B

135	67.80	1.3822	152.20	A,B
136	67.99	1.3788	76.10	A,B
137	68.19	1.3752	74.54	A,B
138	68.39	1.3718	37.27	A,B
139	68.46	1.3705	85.10	A,B
140	68.66	1.3671	42.55	B
141	69.11	1.3591	58.02	B
142	69.31	1.3558	29.01	B
143	69.52	1.3523	101.38	—
144	69.71	1.3489	50.69	B
145	73.81	1.2838	92.50	A,B
146	74.03	1.2806	46.25	B
147	75.90	1.2536	84.65	A,B
148	76.13	1.2505	42.33	B
149	76.96	1.2390	70.56	B
150	77.18	1.2359	35.28	B
151	79.97	1.1997	93.96	A,B
152	80.21	1.1968	46.98	A,B
153	80.86	1.1888	134.45	B
154	81.10	1.1858	67.22	B
155	81.27	1.1838	159.97	A,B
156	81.51	1.1809	79.99	A,B

PEAK UTAMA (DIAGNOSTIC PEAKS) TIAP FASE

$\theta = 2\theta / 2$. d dihitung dengan Hukum Bragg: $d = \lambda / (2 \cdot \sin \theta)$, $\lambda = 1.541874 \text{ \AA}$ (Cu-K α)

Panjang gelombang sinar-X (Cu-K α) 1.541874
 Sudut difraksi terukur $2\theta = 26,72^\circ$
 θ $2\theta / 2$
 $\sin \theta$ $\text{SIN}(\theta)$
 Menggunakan persamaan Hukum Bragg: $d = \lambda / (2 \sin \theta)$

No. Peak	2θ (°)	θ (°)	$\sin(\theta)$	d-spacing (Å)	I/I ₀	Interpretasi Mineral
37	26.72	13.36	0.2311	3.3364	1000.00	Kuarsa (SiO ₂) teridentifikasi sebagai puncak utama dengan intensitas relatif tertinggi (I/I ₀ = 1000) yang menunjukkan dominasi fase kuarsa dalam sampel.
9	20.94	10.47	0.1817	4.2424	225.07	Puncak pada sudut 20.94° menunjukkan kesesuaian nilai d-spacing dengan karakteristik kuarsa dan mengindikasikan kemungkinan adanya

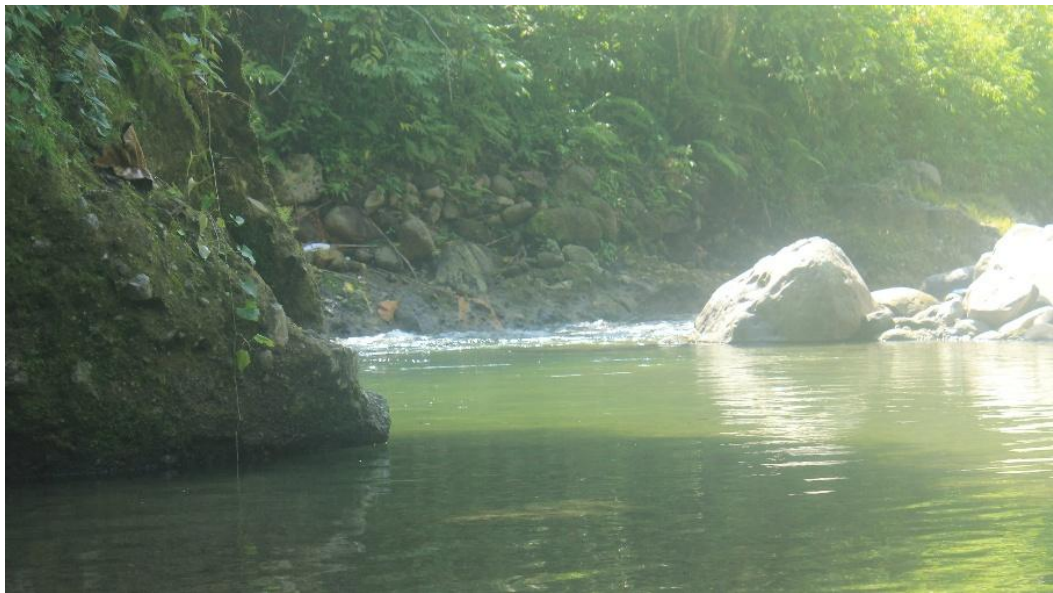
						tumpang tindih dengan fase $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$.
79	39.50	19.75	0.3379	2.2814	113.37	Puncak pada sudut 39.50° diidentifikasi sebagai puncak khas kuarsa karena memiliki nilai d-spacing yang sesuai serta tidak menunjukkan indikasi tumpang tindih dengan fase lain.
43	27.88	13.94	0.2409	3.2002	522.17	Puncak pada sudut 27.88° diinterpretasikan sebagai fase $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ karena nilai d-spacing yang diperoleh tidak sesuai dengan karakteristik kuarsa dan didukung oleh intensitas relatif yang cukup tinggi.
23	24.55	12.28	0.2126	3.6262	406.55	Nilai d-spacing pada sudut 24.55° menunjukkan kesesuaian dengan karakteristik fase $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ sehingga puncak ini digunakan sebagai

						salah satu indikator keberadaan fase tersebut.
38	26.79	13.40	0.2317	3.3278	500.00	Puncak pada sudut 26.79° berada berdekatan dengan puncak utama kuarsa pada 26.72° , namun berdasarkan hasil pencocokan fase menggunakan perangkat lunak Match!, puncak ini lebih sesuai diinterpretasikan sebagai fase $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$.
131	64.82	32.41	0.5360	1.4384	448.56	Puncak pada sudut difraksi tinggi 64.82° menunjukkan kesesuaian dengan karakteristik fase $\text{Cu}_2\text{Fe}_2\text{Ge}_4\text{O}_{13}$ dan digunakan sebagai puncak konfirmasi keberadaan fase tersebut dalam sampel.
45	28.13	14.07	0.2430	3.1723	617.18	Puncak pada sudut 28.13° memiliki intensitas relatif yang cukup tinggi, namun belum dapat diidentifikasi secara pasti berdasarkan database referensi

						yang digunakan sehingga kemungkinan berkaitan dengan fase minor lain dalam sampel.
--	--	--	--	--	--	--



Gambar L1: Dokumentasi kondisi morfologi Sungai Deli di lokasi penelitian.



Gambar L2: Dokumentasi kondisi alur Sungai Deli pada titik pengamatan.



Gambar L3: Proses pengambilan sampel sedimen dan air sungai.



Gambar L4: Dokumentasi sampel sedimen dan air sungai hasil penelitian.

DAFTAR RIWAYAT HIDUP



IDENTITAS PRIBADI

Nama : Miranda Yasmin
Tempat, Tanggal Lahir : Medan, 06 Juni 2004
Jenis Kelamin : Perempuan
Agama : Islam
Alamat : Jl. Imam-Puskemas Gg. Ridho N0 26 C LK III
No Hp : 08561772551
E-Mail : Mirandaayasminn@gmail.com

RIWAYAT PENDIDIKAN

SDS CITRA INDONESIA	Tahun Lulus 2016
MTSN 3 MEDAN	Tahun Lulus 2019
MAN 2 MODEL MEDAN	Tahun Lulus 2022