© 2026 Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP
JURNAL ILMU LINGKUNGAN
Volume 24 Issue 6 (2026) : 1341-1348 *ISSN 1829-8907*

Karakterisasi Mineral Sedimen Dasar Sungai Bawah Tanah Leang Londrong Kawasan Karst Pangkep TN Bantimurung Bulusaraung

Mufliha Aswan, Muhammad Arsyad*, dan Sulistiawaty

Program Studi Fisika, FMIPA, Universitas Negeri Makassar, Makassar, Indonesia; e-mail: m_arsyad288@unm.ac.id

ABSTRAK

Sedimen sungai bawah tanah pada kawasan karst menyimpan informasi tentang pelapukan batuan karbonat, suplai material permukaan, dan proses transportasi di dalam jaringan lorong bawah tanah. Penelitian ini mengkaji karakteristik fisik dan komposisi mineral sedimen permukaan pada aliran Sungai Bawah Tanah Leang Londrong, Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung, Pangkep, Sulawesi Selatan. Sampel diambil pada lima titik di segmen hilir sungai bawah tanah. Pada setiap titik dikumpulkan dua fraksi, yaitu sedimen kasar (A) dan sedimen halus (B), sehingga diperoleh sepuluh sampel. Pengamatan fisik mencakup ukuran butir, bentuk fragmen, warna, tekstur, dan indikasi pelapukan. Komposisi mineral diidentifikasi menggunakan X-ray diffraction (XRD) dan pencocokan pola difraksi dengan basis data mineral. Hasil menunjukkan bahwa sedimen kasar didominasi fraksi kerikil hingga kerakal, bentuk angular hingga sub-angular, dan warna putih sampai krem yang berkaitan dengan material karbonat. Sebaliknya, sedimen halus didominasi pasir sampai lanau, cenderung sub-rounded hingga sub-angular, berwarna coklat sampai coklat tua, dan memperlihatkan komposisi mineral yang lebih bervariasi. Calcite (CaCO3) merupakan fase dominan pada seluruh sedimen kasar, dengan kisaran 65,3-100%. Fraksi halus mengandung quartz, graphite, garnet, mineral fosfat, silikat-aluminat, serta fase minor yang mengandung La dan Tb. Pola ini menunjukkan bahwa sedimen kasar terutama berasal dari pelapukan lokal batu gamping, sedangkan sedimen halus merekam pencampuran material karbonat dan non-karbonat melalui transportasi aliran, infiltrasi permukaan, dan proses geokimia di lingkungan gua. Identifikasi fase minor, terutama yang berasosiasi dengan unsur tanah jarang, masih perlu diverifikasi menggunakan XRF atau ICP-MS sebelum ditafsirkan sebagai pengayaan geokimia yang definitif.

***Kata kunci*:** Sedimen, Sungai Bawah Tanah, XRD, Mineral, Leang Londrong, TN Babul

ABSTRACT

Underground-river sediments in karst environments record carbonate weathering, surface-derived inputs, and sediment transport within subsurface conduits. This study examines the physical characteristics and mineral composition of surface sediments from the Leang Londrong underground river, Bantimurung Bulusaraung National Park, Pangkep, South Sulawesi, Indonesia. Samples were collected from five points along the downstream segment of the underground river. At each point, two fractions were obtained, namely coarse sediment (A) and fine sediment (B), resulting in ten samples. Physical observations included grain size, fragment shape, color, texture, and weathering features. Mineral phases were identified using X-ray diffraction (XRD) and pattern matching against mineral databases. The coarse sediments were dominated by gravel- to cobble-sized particles, angular to sub-angular fragments, and white to cream colors, indicating a strong carbonate contribution. In contrast, the fine sediments were dominated by sand to silt fractions, generally sub-rounded to sub-angular, brown to dark brown in color, and showed more variable mineral compositions. Calcite (CaCO3) was the dominant phase in all coarse sediments, ranging from 65.3 to 100%. Fine sediments contained quartz, graphite, garnet, phosphate minerals, aluminosilicates, and minor phases containing La and Tb. These patterns suggest that coarse sediments mainly represent local limestone weathering, whereas fine sediments record mixing between carbonate and non-carbonate materials through flow transport, surface infiltration, and cave geochemical processes. Minor phases associated with rare earth elements should be treated as preliminary indications and verified by XRF or ICP-MS before being interpreted as definitive geochemical enrichment

***Keywords*:** Sediment, Underground Rivers, XRD, Mineralogy, Leang Londrong, Babul National Park

Citation: Aswan, M., Arsyad, M., dan Sulistiawaty. (2026). Karakterisasi Mineral Sedimen Dasar Sungai Bawah Tanah Leang Londrong Kawasan Karst Pangkep TN Bantimurung Bulusaraung. Jurnal Ilmu Lingkungan, 24(6), 1341-1348, doi:10.14710/jil.24.6.1341-1348

1. PENDAHULUAN

Sistem hidrologi karst terbentuk sebagai hasil proses pelarutan batuan karbonat yang menghasilkan jaringan aliran air yang kompleks dan memiliki karakteristik khas dibandingkan sistem hidrologi pada lingkungan non-karst (Auler & Stevanovic, 2021). Sistem hidrologi di Kawasan karst memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan wilayah lain, ditandai dengan rendahnya akumulasi air di permukaan akibat cepatnya air hujan meresap ke dalam tanah. Kawasan karst tersusun atas batuan batuan karbonat yang mudah mengalami pelarutan, seperti batu gamping, sehingga menghasilkan morfologi khas berupa dolina, ponor, lorong gua, dan sistem sungai bawah tanah (Ford & Williams, 2007; Agniy *et al,* 2017; Nugroho, Pulung & Utomo, 2016).

Kawasan Karst Maros-Pangkep di Sulawesi Selatan merupakan salah satu kawasan karst tropis penting di Indonesia. Secara geologis, kawasan ini terbentuk melalui proses pelarutan (karstifikasi) yang berlangsung dalam jangka waktu geologis akibat interaksi antara air, udara, dan batuan karbonat (Setowati & Junaidi, 2016). Wilayah ini ditandai dengan sistem gua serta aliran sungai bawah tanah yang rumit, dan salah satunya berada di Leang Londrong, Kabupaten Pangkep.

Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung merupakan salah satu kawasan karst terbesar di Indonesia yang memiliki sistem sungai bawah tanah yang cukup berkembang. Sungai bawah tanah pada kawasan ini berperan penting sebagai bagian dari sistem akuifer karst sekaligus sebagai media transportasi material sedimen hasil interaksi antara air dan batuan penyusun kawasan karst (Aryad *et al,* 2013; Geng *et al.,* 2022).

Sedimen yang terendapkan pada dasar aliran sungai bawah tanah mengandung berbagai jenis material yang berasal dari batuan karbonat, material lempung, kuarsa, maupun mineral lain yang terbawa dari proses pelapukan dan erosi di daerah tangkapan air (Maizar & Hastuti, 2017). Penelitian Soma *et al.* (2021) menggunakan metode geolistrik memperlihatkan bahwa struktur bawah permukaan Gua Leang Londrong tersusun atas batu gamping lanau dan sebagian batu gamping pasir, dengan variasi nilai resistivitas pada setiap lindasan. Temuan ini memperlihatkan peranan signifikan proses pelarutan batuan karbonat dalam membentuk morfologi serta dinamika hidrologi bawah tanah.

Sedimen permukaan pada aliran sungai bawah tanah dapat menjadi indikator penting dalam memahami interaksi antara material hasil pelarutan karbonat dengan dinamika transportasi sedimen bawah tanah. Komposisi mineral seperti *calcite, dolomit,* maupun mineral lempung dapat mencerminkan intesitas pelarutan dan kondisi geokimia yang terjadi (White, 1988). Karakteristik fisik sedimen dan komposisi mineral merupakan dua aspek yang saling berkaitan dalam kajian sedimentologi. Karakteristik fisik seperti ukuran butir, bentuk, dan warna sedimen mencerminkan proses transportasi dan pengendapan material di lingkungan kawasan karst (Arsyad, 2000; Zerga, 2024; Nannoni *et al,* 2021), sedangkan komposisi mineral memberikan informasi mengenai asal-usul serta kondisi lingkungan pengendapannya. Komposisi mineral sedimen dapat digunakan untuk menginterpretasikan sumber material dan proses sedimentasi yang memengaruhi pembentukan sedimen (Tucker, 2001).

Penelitian Zak *et al,* (2010), dengan mengambil sampel tanah *plagioclass* di kawasan karst dengan variasi ukuran. Hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian besar sampel tersusun atas *twin lamellae* berukuran tidak teratur (antara 2 hingga 5 butir) serta mengandung kalsit silikat. Ukuran partikel sedimen yang terbawa oleh aliran air dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti ukuran material yang masuk ke saluran, kondisi morfologi saluran, debit aliran, dan sifat fisik sedimen itu sendiri (Asdak, 2010; Rahayu *et al,* 2009).

Penerapan *X-Ray Diffraction* (XRD) dalam penelitian Sukmawati *et al,* (2015) dan Sari *et al,* (2019) terhadap ornamen Gua Salukang Kallang di Kawasan Karst Maros, menunjukkan bahwa sampel stalaktit, stalagmit, pilar, dan *flowstone* pada gua tersebut didominasi oleh mineral *calcite* ($CaCO_3$) dengan persentase mencapai 99%, disertai kandungan minor seperti *graphite quartz* (SiO_2), dan *rutile.* Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa ornament gua masih aktif terbentuk akibat rembesan air. Hasil tersebut juga menunjukkan bahwa metode XRD efektif dalam mengidentifikasi komposisi mineral dan mendukung kajian proses geokimia di lingkungan karst, sebagaimana juga ditunjukkan pada karakterisasi *speleotem* karbonat di gua-gua lain menggunakan kombinasi XRD dan analisis termal (Filenko, 2023).

Penelitian Rahmi *et al.* (2022) yang menganalisis kandungan mineral ornamen Gua Leang Londrong menggunakan teknik *X-Ray Diffraction* (XRD), hasil kajian menunjukkan bahwa ornamen gua didominasi oleh karbon dan mineral *calcite* tidak murni hasil pelarutan batu gamping serta terdeteksi keberadaan unsur logam tanah jarang (*Rare Earth Element*) seperti *Iterbium* (Yb), *Yttrium* (Y), *Serium* (Ce), dan *Lanthanum* (La). Penelitian lain dilakukan oleh Sandi *et al.* (2024), menggunakan metode suseptibilitas magnetic dan analisis XRD untuk mengidentifikasi kandungan mineral dalam guano gua. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa mineral yang terindentifikasi seperti, *aluminium hydroxide, aluminosilikat, feldspar, magnetit,* dan *kuarsa*.

Kajian-kajian XRD terdahulu di kawasan Leang Londrong, termasuk penelitian Rahmi *et al.* (2022), serta kajian pada ornamen Gua Salukang Kallang oleh Sukmawati *et al.* (2015) dan Sari *et al.* (2019), secara konsisten difokuskan pada mineral ornamen gua (*speleotem*) seperti stalaktit, stalagmite, dan *flowstone*, yang terbentuk melalui presipitasi kimiawi dari air rembesan, sedangkan penelitian ini berfokus pada sedimen dasar sekitar aliran sungai Leang

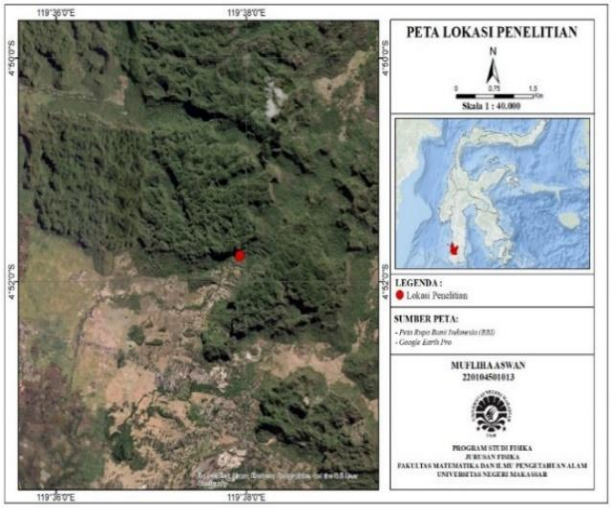
© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Londrong bagian segmen hilir, serta pada pola spasial komposis mineral di sepanjang titik pengamatan yang dikaitkan dengan posisi, karakter aliran, dan kemungkinan sumber material. Penelitian ini menunjukkan bahwa setiap titik yang berbeda juga memberikan informasi tentang karakteristik yang berbeda Sedimen klastik dasar sungai merekam proses geologi yang berbeda dari ornamen gua, yaitu pelapukan batuan induk, transportasi oleh aliran air, serta pencampuran material dari dalam dan luar sistem gua, sehingga tidak dapat disamakan dengan proses presipitasi kimiawi yang membentuk *speleotem*. Kebaruan penelitian ini terletak pada karakteristik fisik dan mineral sedimen dasar sungai bawah tanah Leang Londrong yang melengkapi pemahaman sistem karst tersebut yang sebelumnya hanya terbatas pada aspek ornament gua dan struktur geolistrik bawah permukaan (Soma *et al,* 2021).

Kajian tersebut semakin penting di kawasan karst dengan hidrologi bawah tanah yang kompleks, karena sedimen yang tertransportasi dapat merekam informasi tentang pelapukan batuan, transportasi material, dan kondisi geologi sekitarnya. Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung dengan sistem sungai bawah tanahnya berpotensi menyimpan informasi dinamika lingkungan melalui karakteristik sedimen yang terbawa aliran air. Oleh karena itu penelitian ini dilakukan untuk mengindentifikasi karakteristik fisik sedimen pada aliran sungai bawah tanah Leang Londrong Kawasan Karst Pangkep Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung dan menganalisis komposisi mineral sedimen menggunakan metode XRD.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini berlangsung selama 7 (tujuh) bulan terhitung dari bulan Juli 2025-Januari 2026 di area sekitar aliran Sungai Bawah Tanah Leang Londrong, Kawasan Karst Pangkep Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

Data yang digunakan dalam penelitian ini merupakan data primer yang diperoleh secara langsung melalui pengamatan lapangan dan pengujian laboratorium. Data primer meliputi:

1) Data karakteristik fisik sedimen berupa ukuran butir, bentuk fragmen, warna, dan tekstur.
2) Data lokasi pengambilan sampel pada 5 (lima) titik pengamatan (S1-S5) menggunakan metode *Purpose Transect Sampling* di segmen hilir Sungai Bawah Tanah Leang Londrong.
3) Data sampel sedimel yang terdiri atas sedimen kasar (kode A) dan sedimen halus (kode B), sehingga diperoleh total 10 (sepuluh) sampel dengan massa minimum 500gr pada setiap titik.

Sedangkan untuk data laboratorium meliputi:

1) Data hasil preparasi sampel melalui proses pengeringan pada suhu 100˚C, pengayakan menggunakan ayakan 10 *mesh,* penggerusan menggunakan mortar, dan pengayakan Kembali dengan ayakan 100 *mesh* hingga diperoleh ukuran partikel ≤0,149 mm, yang dilakukan di Laboratorium Fisika Bumi, Jurusan Fisika, FMIPA UNM.
2) Data pola difraksi hasil pengujian XRD, yang dilakukan pada Laboratorium Penelitian dan Pengembangan Sains Universitas Hasanuddin.
3) Data hasil analisis pengujian XRD, yang dilakukan pada Laboratorium Fisika Bumi, Jurusan Fisika, FMIPA UNM.

Identifikasi fase mineral dilakukan melalui pencocokan pola difraksi menggunakan perangkat lunak *Match!* Dengan rujukan data COD (*Crystallography Open Database*). Persentase relatif setiap fase dihitung secara semi-kuantitatif menggunakan metode RIR (*Reference Intensity Ratio*) yang tersedia pada perangkat lunak tersebut, bukan melalui penghalusan *Rietveld* penuh, dengan batas deteksi instumen berkisar 1-5% berat untuk XRD bubuk, sehingga fase dengan persentase yang sangat kecil di bawah 1-2% perlu diinterpretasikan secara hati-hati sebagai estimasi, bukan nilai kuantitatif yang presisi.

Adapun alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah GPS, timbangan digital, ayakan 10 dan 100 *mesh*, mortar, palu geologi, oven, kantong sampel, sekop mini, ArcGIS, alat tulis, sampel sedimen, dan tissue. Adapun tahapan dalam penelitian meliputi, persiapan seperti kajian literatur, penyiapan perizinan, persiapan alat-alat yang dibutuhkan, dan observasi lapangan untuk mendapatkan gambaran tentang daerah penelitian.

Pada tahap lapangan, penentuan lokasi pengambilan sampel dilakukan menggunakan metode *Purpose transect sampling,* yaitu menentukan suatu jalur pengamatan mengikuti aliran Sungai Bawah Tanah Leang Londrong (Santoso, 2016), pada segmen hilir Sungai Bawah Tanah Leang Londrong. Pengambilan sampel dilakukan pada 5 (lima) titik pengamatan S1-S5. Penentuan titik bertujuan untuk mengamati variasi karakteristik fisik dan komposisi mineral sedimen yang dipengaruhi oleh proses

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

transportasi, pengendapan, dan interaksi geokimia sepanjang aliran sungai bawah tanah. Pada setiap titik diambil 2 (dua) jenis sampel, yaitu sampel sedimen kasar (batuan) dan sedimen halus (tanah), sehingga diperoleh total 10 (sepuluh) sampel dengan massa minimal 500 gram per titik. Tahap preparasi sampel meliputi pengeringan menggunakan oven pada suhu 100˚C, pengayakan dengan 10 *mesh*, penggerusan menggunakan mortar, dan pengayakan Kembali menggunakan ayakan 100 *mesh* sehingga diperoleh ukuran partikel ≤0,149mm sesuai standar analisis *X-Ray Diffraction* (XRD). Sampel yang telah dipreparasi kemudian di analisis untuk mengidentifikasi komposisi mineral penyusun sedimen.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Karakteristik Material Sedimen Permukaan pada Aliran Sungai Bawah Tanah di Kawasan Karst Leang Londrong

Hasil pengamatan karakteristik fisik sedimen pada kelima titik pengamatan menunjukkan pola konsisten antara sedimen kasar dan sedimen halus dapat dilihat pada Tabel 1. Secara umum, sedimen kasar didominasi oleh kerikil hingga kerakal (2-256 mm) dengan bentuk fragmen angular hingga sub-angular yang menunjukkan material belum mengalami transportasi jauh dari sumbernya, sedangkan sedimen halus didominasi oleh ukuran pasir hingga lanau dengan bentuk *sub-rounded* hingga sub-angular yang menunjukkan adanya proses tranportasi oleh aliran air.

Hubungan antara bentuk fragmen dan jarak transportasi tersebut bersifat indikatif. Interpretasi jarak transportasi berdasarkan bentuk butir dijadikan sebagai perkiraan awal, dan lebih kuat apabila didukung oleh data hidrodinamika lapangan pada penelitian selanjutnya.

Variasi warna sedimen yang ditemukan mencerminkan perbedaan material penyusunnya. Pada sampel kasar, warna didominasi warna putih keabu-abuan hingga krem yang mengindikasikan komposisi karbonat tinggi dari batu gamping kawasan karst, sebaliknya, warna kecoklatan, kehijauan, dan kemerahan pada beberapa sampel menunjukkan adanya proses pelapukan lebih lanjut dan keberadaan mineral non-karbonat. Warna kemerahan berkaitan dengan proses oksida unsur Fe selama pelapukan batuan (Gianetta *et al,* 2022), sedangkan warna kehijauan kemungkinan dipengaruhi oleh kondisi reduktif atau aktivitas biologis.

Pada sampel halus, warna coklat hingga coklat tua mendominasi semua titik pengamatan, mengindikasikan kandungan bahan organik serta material non-karbonat yang terbawa melalui infiltrasi permukaan ke dalam sungai bawah tanah. Adapun tingkat pelapukan yang lebih lanjut yang menunjukkan kondisi batuan rapuh dan mudah terfragmentasi, yang merupakan hasil interaksi intensif antara air bawah tanah yang bersifat sedikit asam dengan batuan karbonat.

3.2. Komposisi Mineral Sedimen Berdasarkan Analisis *X-Ray Diffraction* (XRD)

Berdasarkan hasil analisis XRD, mineral *calcite* ($CaCO_3$) terindentifikasi sebagai mineral dominan pada seluruh sampel sedimen kasar (Gambar 2). Pada titik S1A, *calcite* mendominasi dengan persentase 100%, sedangkan pada titik S2A, S3A, S4A, dan S5A, *calcite* masih menjadi mineral utama dengan persentase berturut-turut 73,4%, 71,6%, 91,7%, dan 65,3%, dapat dilihat pada Tabel 1. Dominasi *calcite* pada sedimen kasar ini merupakan konsekuensi langsung dari karakter litologi kawasan karst yang tersusun atas batu gamping (*limestone*) dengan kandungan $CaCO_3$ yang tinggi.

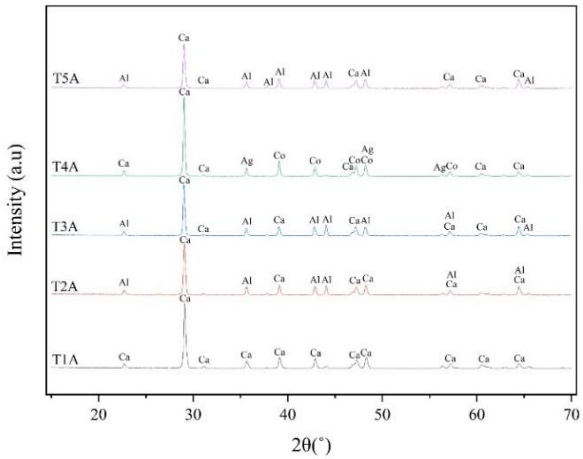
Tabel 1. Karakteristik Fisik Sedimen Setiap Titik

Kode Sampel	Ukuran/bentuk	Warna/tekstur	Interpretasi
S1A	Kerikil-kerakal; angular-sub-angular	Putih keabu-abuan - abu-abu kehijauan; fragmen batuan	Material karbonat lokal, transportasi pendek.
S1B	Pasir-lanau; granular; cenderung sub-rounded	Coklat - coklat gelap; relative seragam	Transportasi aliran lebih nyata, ada bahan organik/non-karbonat.
S2A	Kerikil-kerakal; angular-sub-angular	Putih kekuningan - krem	Material karbonat dengan pengotor minor.
S2B	Pasir halus; cenderung sub-rounded	Coklat tua – coklat keabu-abuan	Fraksi halus, lebih terpilah bercampur bahan organik.
S3A	Kerikil-kerakal; angular-sub-angular	Putih – putih kecoklatan bercak kemerahan	Karbonat dengan indikasi oksidasi Fe/pelapukan.
S3B	Pasir-lanau; sub-angular-sub-rounded; agregat	Coklat- coklat kemerahan	Pelapukan dan pengendapan berlangsung bersamaan.
S4A	Kerikil-kerakal; fragmen rapuh	Putih kusam, keabu-abuan, sedikit kecoklatan	Pelapukan lanjut dan pencampuran material.
S4B	Pasir sangat halus-lanau; agregat kecil	Coklat gelap – coklat kehijauan; lembab	Lingkungan energi rendah dan kemungkinan kondisi reduktif.
S5A	Kerikil-kerakal; angular-sub-angular	Bagian luar kehijauan-keabu-abuan bagian dalam lebih terang	Pelapukan kimia tidak homogen pada permukaan fragmen.
S5B	Fraksi halus bercampur butir kasar kecil	Coklat keabu-abuan; butiran relative lepas	Transportasi tidak sepenuhnya selektif.

Sumber data primer hasil observasi langsung dan hasil interpretasi penelitian, 2026

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

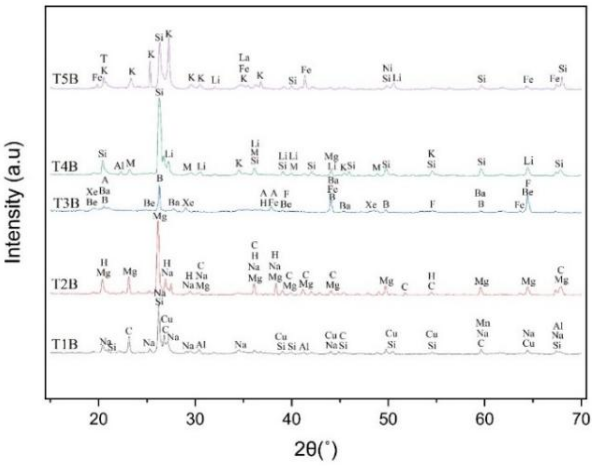
Pada sampel halus (Gambar 3), komposisi mineral jauh lebih beragam dibandingkan sedimen kasar. Pada titik S1B, mineral dominan adalah *quartz* (SiO_2) sebesar 59,2%, *graphite* (C) 20,7%, dan *alum-(Na)* 11,4% dapat dilihat pada Tabel 2. Adanya *quartz* mengindikasikan adanya kontribusi material silikat dari luar sistem karbonat, sementara *graphite* menunjukkan akumulasi material organik. Pada titik S2B dan S3B, terindentifikasi mineral *fosfat* kompleks seperti *Farringtonite* ($Mg_3O_8P_2$) dan AlO_4P yang menunjukkan pengaruh interaksi geokimia dalam lingkungan bawah tanah.



Gambar 2. Hasil Analisis XRD pada Sampel Sedimen Kasar

Temuan paling signifikan pada sampel S5B, yaitu diduga teridentifikasinya unsur tanah jarang (*Rare Earth Elements*/REE) berupa *Terbium* (Tb) dan *Lanthanum* (La) yang ditunjukkan pada Gambar 3. Kehadiran REE mengindikasikan adanya proses pengayaan geokimia dalam sistem bawah tanah melalui interaksi jangka panjang antara air bawah tanah dan batuan pembawa mineral logam. Temuan ini sejalan dengan penelitian Rahmi *et al.* (2022), yang mengidentifikasi keberadaan REE pada ornamen Gua Leang Londrong, mengkorfirmasi bahwa sistem karst ini memiliki potensi geokimia yang signifikan. Fase yang mengandung La dan Tb pada S5B menarik untuk dicatat, tetapi harus diposisikan sebagai indikasi awal, sumber pasti unsur tersebut belum dapat ditentukan melalui analisis XRD sehingga masih diperlukan analisis geokimia unsur jejak untuk mengidentifikasi batuan asalnya. XRD bukan metode paling kuat untuk memastikan unsur tanah jarang pada kadar rendah, terutama bila puncak difraksi tumpang tindih dengan fase lain.

Kajian pada material lapukan batuan karbonat di kawasan karst lain menunjukkan bahwa unsur tanah jarang dapat terkumulasi secara signifikan melalui proses pelapukan jangka panjang, meskipun konsentrasi dan pola fraksionasinya sangat bergantung pada kondisi geokimia setempat sehingga tidak dapat digeneralisasi tanpa data unsur yang terukur (Zhang *et al.,* 2020). Untuk publikasi, temuan tersebut sebaiknya menjadi dasar rekomendasi analisis lanjutan menggunakan XRF, ICP-MS, atau SEM-EDS, bukan sebagai klaim eksplorasi sumber daya.



Gambar 3. Hasil Analisis XRD pada Sampel Sedimen Halus

Hasil penelitian menunjukkan adanya keterkaitan yang jelas antara karakteristik fisik sedimen dan komposisi mineralnya. Sedimen kasar yang berukuran kerikil hingga kerakal dengan bentuk angular hingga sub-angular cenderung didominasi oleh mineral karbonat, terutama *Calcite*. Karakteristik fisik ini menunjukkan bahwa material masih mempertahankan sifat batuan induknya karena mengalami transportasi yang relatif pendek dari sumber batuan gamping di sekitar aliran sungai bawah tanah (Addesso *et al.,* 2022; Ballesteros *et al.,* 2023).

Sebaliknya, sedimen halus yang berukuran pasir hingga lanau dengan bentuk *sub-rounded* hingga *sub-angular* memiliki komposisi mineral yang jauh lebih beragam, yang dapat berkaitan dengan pencampuran material dari berbagai sumber selama proses transportasi dan pengendapan di lingkungan karst (Arriolabengoa *et al.,* 2015; Mueller *et al.,* 2023). Proses transportasi oleh aliran air bawah tnah dapat menyebabkan terjadinya pemindahan, pengendapan, dan pengangkutan Kembali sedimen di sepanjang *conduit* karst (Bettel *et al.,* 2022).

Perbedaan ukuran dan sifat fisik butir dapat memengaruhi proses transportasi dan pengendapan, sehingga material dari sumber yang berbeda dapat terakumulasi pada fraksi sedimen yang relatif halus (Jukic *et al.,* 2022). Keragaman mineral ini mencakup *Quartz* yang berasal dari material silikat allokton yang masuk ke sistem karst melalui proses infiltrasi atau transportasi permukaan (Addesso *et al.,* 2022), mineral fosfat dari interaksi geokimia, dan bahkan REE dari batuan pembawa mineral logam.

Warna sedimen juga menunjukkan hubungan konsisten dengan komposisi mineral. Sedimen berwarna putih hingga krem pada sampel sedimen kasar berkorelasi dengan dominasi mineral karbonat *Calcite* (Barudzija *et al.,* 2024), sementara sedimen halus berwarna coklat hingga coklat tua berkorelasi dengan keberadaan bahan organik dan mineral non-karbonat yang lebih beragam.

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Tabel 2. Komposisi Mineral pada Sedimen Kasar Setiap Titik

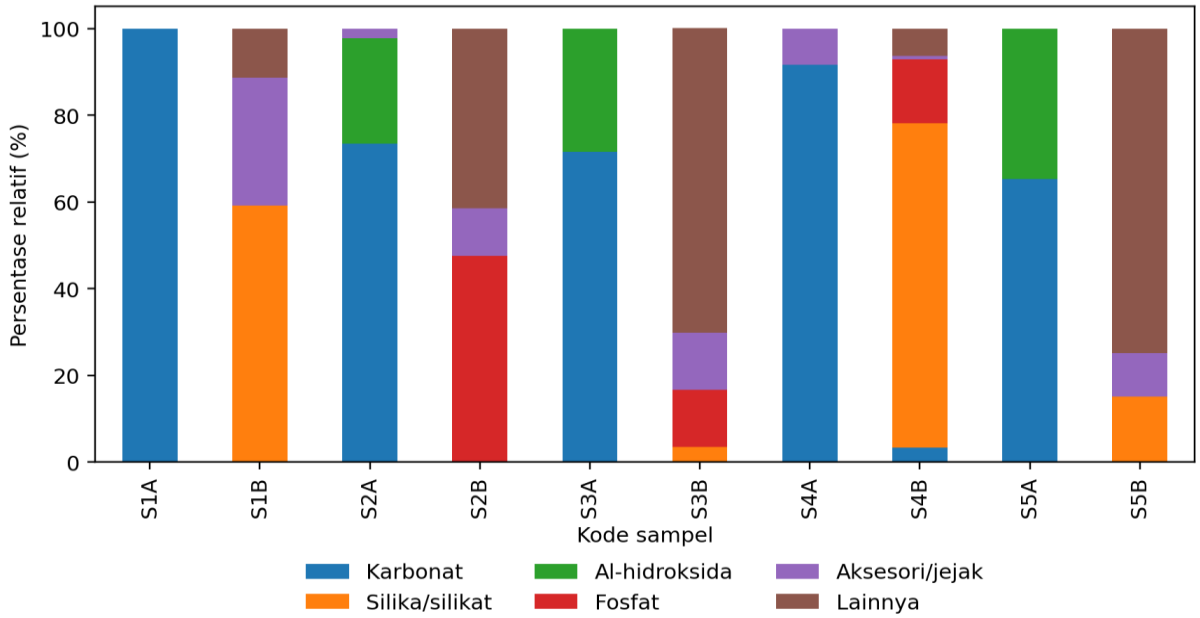
Jenis Sampel	Mineral	Persentase tiap Titik (%)				
		T1	T2	T3	T4	T5
Sedimen Kasar	*Calcite*	100	73,4	71,6	91,6	65,3
	Diaspore	-	24,3	28,4	-	34,7
	Iron	-	2,3	-	-	-
	$(CoFe_2)O_4$	-	-	-	6,0	-
	Ag ($Cd_{0.6}$ $Zn_{0.4}$)	-	-	36.0	2,3	-

Sumber data diolah dari hasil analisis XRD

Tabel 3. Komposisi Mineral pada Sedimen Halus Setiap Titik

Jenis Sampel	Mineral	Persentase tiap Titik (%)				
		T1	T2	T3	T4	T5
Sedimen Kasar	*Quartz*	59	-	-	75	11
	Graphite	21	-	-	-	-
	Alum-(Na)	11	-	-	-	-
	Garnet	5,6	-	-	-	-
	Choloalite	2,5	-	-	-	-
	Manganese-delta	0,6	-	-	-	-
	Farringtonite	-	48	-	-	-
	Flour-schorl	-	23	-	-	-
	Podlesnoite	-	18	-	-	-
	Magnesium thiosulfate hexahydrate	-	11	-	-	-
	AlO_4P	-	-	45	15	-
	Beryllium bis (hypophosphite)	-	-	13	-	-
	Magnesiowuestite	-	-	13	-	-
	Hydrogen	-	-	9,4	-	-
	Ba O_2 (H_2 O_2)$_2$	-	-	8,9	-	-
	Sodium aluminate silicate	-	-	4,7	-	-
	Silicon fluoride	-	-	3,5	-	-
	Xe O_3	-	-	2	-	-
	Potassium	-	-	-	4	-
	Magnesium Calcium Carbonate	-	-	-	3,4	-
	Lithium antimony (V) tungstate	-	-	-	2,2	-
	Periclase	-	-	-	0,8	-
	Alum-(K)	-	-	-	-	71
	Iron Boron	-	-	-	-	7,9
	Dilithium Oxide	-	-	-	-	3,9
	Tridymite	-	-	-	-	3,7
	$Ni_{12}TbB_6$	-	-	-	-	1,4
	$LaCo_2Si_2$	-	-	-	-	0,7

Sumber data diolah dari hasil analisis XRD



Gambar 4. Grafik Sebaran Mineral pada Semua Titik

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Secara spasial, perbedaan komposisi antar titik pengamatan (S1-S5) dapat dikaitkan secara lebih sistematis dengan posisi masing-masing titik pada segmen hilir aliran, karakter aliran setempat, dan kemungkinan sumber materialnya. Titik S1, yang berada paling dekat dengan segmen atas aliran yang diamati, didominasi *calcite* hampir murni (100%) pada fraksi kasar serta *quatz* dan *graphite* pada frkasi halus, yang mengindikasikan material belum banyak tercampur dan masih mencerminkan pelapukan lokal batu gamping di sekitarnya. Pada titik S2 dan S3, penurunan persentase *calcite* (73,4% dan 71,6%) yang disertai kemunculan *diaspore* serta mineral fosfas kompleks seperti *farringtonite* dan AlO_4P mengindikasikan interaksi geokimia yang lebih intensif, kemungkinan berkaitan dengan segmen aliran yang lebih tenang atau zona genangan sehingga waktu kontak antara air dan batuan menjadi lebih lama. Titik S4 menunjukkan peningkatan kembali persentase *calcite* (91,6%) yang diduga berkaitan dengan segmen berenergi aliran lebih tinggi, di mana material halus lebih mudah tersapu sehingga fragmen karbonat kasar lebih dominan tertinggal. Sebaliknya, titik S5 sebagai titik paling hilir dari segmen yang diamati memiliki persentase *calcite* terendah (65,3%) disertai kemunculan fase yang diduga mengandung La dan Tb.

Pola penurunan (Gambar 4) kemurnian *calcite* kearah hilir ini secara umum konsisten dengan akumulasi progresif material non-karbonat dari berbagai sumber di sepanjang lintasan aliran, termasuk ilfiltrasi permukaan, pencampuran sedimen dari cabang lorong lain, dan proses geokimia sekuder, sehingga posisi titik pengamatan dapat dipandang sebagai proksi kasar bagi jarak transportasi dan intensitas interaksi air-batuan pada sistem sungai bawah tanah tersebut. Pendekatan yang mengaitkan variasi komposisi sedimen sedimen dengan posisi titik pengambilan sampel di sepanjang jalur aliran ini sejalan dengan kajian penelusuran sumber sedimen (*sediment provenance*) pada daerah tangkapan air karst lainnya, yang juga menunjukkan bahwa litologi, topografi, dan jarak dari sumber material memengaruhi variasi komposisi sedimen di sepanjang aliran (Tian *et al.,* 2023).

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa karakteristik fisik sedimen dasar pada aliran Sungai Bawah Tanah Leang Londrong terdiri atas sedimen kasar yang didominasi oleh ukuran kerikil hingga kerakal dengan bentuk *angular* hingga *sub-angular* serta warna putih dan krem, dan sedimen halus yang didominasi oleh ukuran pasir hingga lanau dengan bentuk *sub-rounded* hingga *sub-angular* serta berwarna coklat.

Komposisi mineral sedimen dasar didominasi oleh *calcite* ($CaCO_3$) pada seluruh sampel sedimen kasar sebesar 65-100%, sementara sedimen halus memiliki komposisi yang lebih beragam mencakup *quartz* (SiO_2), *graphite* (C), *garnet, aluminum phosphate,* dan *magnesite,* serta terdeteksi mineral yang diduga mengandung unsur tanah jarang (REE) seperti *Lanthanum* (La) dan *Terbium* (Tb), identifikasi fase yang diduga membawa REE ini masih bersifat indikasi awal dan memerlukan verifikasi lebih lanjut menggunakan analisis unsur seperti XRF atau ICP-MS sebelum dapat ditafsirkan sebagai pengayaan geokimia yang denitif.

DAFTAR PUSTAKA

Addesso, R., De Waele, J., Cafaro, S. (2022). Geochemical characterization of clastic sediments sheds light on energy sources and on alleged anthropogenic impacts in cave ecosystems. *International Journal of Earth Sciences, 111*, 919–927

Agniy, R.F., Cahyadi, A., & Nurkholis, A. (2017). Analisis Karakteristik Akuifer dengan Uji Perunutan dan Pemetaan Gua. Proceeding, Kongres & Pertemuan Ilmiah Tahunan Ke-2.

Arriolabengo, M., Iriarte, E., Aranburu, A., Yusta, I., Arrizabolaga, A. (2015). Provenance study of endokarst fine sediments through mineralogical and geochemical data (Lezetxiki II cave, northern Iberia). *Quaternary International, 364*, 231–243.

Arsyad, M., Pawitan, H., Sidauruk, P., Putri, E. I. K. (2013). Analisis Ketersediaan Air Sungai Bawah Tanah dan Pemanfaatan Berkelanjutan di Kawasan Karst Maros Sulawesi Selatan. *Manusia dan Lingkungan 21*(1). 8-14.

Arsyad, S. (2000). *Konservasi Air dan Tanah*. IPB Press.

Asdak, C. (2007). *Hidrologi dan Pengelolaan Daerah Aliran Sungai*. Gadjah Mada University Press.

Auler, A. S., & Stevanovic, Z. (2021). Preface: Five decades of advances in karst hydrogeology. *Hydrogeology Journal 29*, 1-6.

Ballesteros, D., Farrant, A., Sahy, D., Genuite, K., Bejarano, I., & Nehme, C. (2023). Going with the flow: Sedimentary processes along karst conduits within Chalk aquifers, northern France. *Sedimentary Geology, 452*, 106422.

Barudzija, U., Kamenski, A., Paar, D., & Malvic, T. ko(2024). Applicability of magnetic susceptibility measurements on cave sediments in karst areas: Insight from Dinaric Karst (Velebit Mt., Croatia). *Applied Sciences, 14*(16), 6973.

Bettel, L., Fox, J., Husic, A., Zhu, J., Al Aamery, N., Mahoney, T., & Gold-McCoy, A. (2022). Sediment transport investigation in a karst aquifer hypothesizes controls on internal versus external sediment origin and saturation impact on hysteresis. *Journal of Hydrology, 613*, 128391.

Filenko, R. A. (2023). Features of Carbonate Speleothems from the Belaya Cave (Zabaykalsky Krai). *E3S Web of Conferences 462,* 03039.

Ford, D., & Williams P. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley.

Geng, X., Zhang, F., Chen, Z., Nie, Z., & Zhu, P. (2022). Characterization of Karst Conduit Structure Based on Multisource Artificial Tracer Test: A Case Study of the Cangpuwa Underground River in Guizhou Province. *Geological Science and Technology Bulletin 41*(5). 324-332.

Gianetta, B., Casetta, M., Souza, D. O., Mariotto, G., Aquilanti, G., & Zaccone, C. (2022). Coupling X-ray Absorption and Raman Spectroscopies to Characterize Iron

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP

Spesial in a Karst Pedosedimentary Record. *Soil System 6*(1). 24.

Jukic, D., Denic-Jukic, V., & Kadic, A. (2022). Temporal and spatial characterization of sediment transport through a karst aquifer by means of time series analysis. *Journal of Hydrology, 609.*

Maizar, N, T., & Hastuti, M, S. (2017). Geokimia Airtanah di Kawasan Karst Gunungkidul, DIY. *Prosiding Seminar Nasional Penelitian & Pengabdian pada Masyarakat*.

Mueller, Y. K., et al. (2023). From cave to spring: Understanding transport of suspended sediment particles in a fully phreatic karst conduit using particle analysis and geochemical methods. *Hydrological Processes, 37*(10).

Nanonni, A., Piccini, L., Costagliola, P., Batistoni, N., Gabellini, P., Cioni, R., Pratesi, G., & Bucci, S. (2021). Innovative approaches for the sedimentological characterization of fine natural and anthropogenic sediment in karst system: The case of the apuan alps (central Italy). *Frontiers in Earth Science*.

Nugroho, B., Pulung., Utomo, E. P. (2016). Kualitas batu gamping berdasarkan analisis klasifikasi geomekanik di goa seropan, Gunung Kidul, Yogyakarta. *Bulletin of Scientific Contribution 14*(1). 63-74.

Rahayu, S., Widodo, R, H., Noordwijk, M, V., Suryadi, I., & Verbist, B. (2009). *Monitoring Air di Daerah Aliran Sungai.* World Agroforestry Centre.

Rahmi, N., Arsyad, M., & Susanto, A. (2022). Analisis Karakteristik Mineral Ornamen Gua Leang Lonrong Kawasan Karst Pangkep Sulawesi Selatan Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung. *Jurnal Ilmiah Fisika FMIPA Universitas Lambung Mangkurat. 19*(3)

Sari, A. P., Arsyad, M., & Tiwow, V. A. (2019). Analisis Mineral Pembentuk Facies Gua Salukang Kallang Kawasan Karst Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung Maros. *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika 15*(3). 78-85.

Sandi, I. A., Arsyad. M., & Tiwow, V. A. (2024). Analisis Mineral Magnetik Guano Gua Kawasan Karst Maros Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung. *Jurnal Sains dan Pendidikan 20*(1). 86-96.

Santoso, L. W. (2016). Studi Akuifer pada Bentang Lahan Kepesisiran Kabupaten Kulon Progo, Daerah Istimewa Yogyakarta. *Majalah Geografi Indonesia, 18*(2).

Setyowati, R. D. N., & Junaidi, R. (2016). Analisis Routing Reservoir dalam Pengembangan Sumber Daya Air Kawasan Karst. *Jurnal Teknik Lingkungan 2*(1).

Sukmawati., Palloan, P., & Arsyad, M. (2015). Karakterisasi Jenis Mineral Ornamen Gua Salukang Kallang dengan Metode X-Ray Difrraction (XRD). *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika 11*(3). 266-272.

Soma, A. Z. T., Arsyad, M., Tiwow, V. A. (2021). Analisis Karakteristik Kawasan Gua Leang Lonrong Taman Nasional Bantimurung Bulusaraung. *Jurnal Sains dan Pendidikan Fisika* 17(1). 93-103.

Tian, M., Wang, X., Qiao, Y., Liu, D., Chi, Q., Liu, H., Wang, W., & Zhang, B. (2023). Temporal Variations of Sediment Provenance in a Karst Watershed, China. *Applied Science 13*(2). 771.

Tucker, M. E. (2001). *Sedimentary petrology: An introduction to the origin of sedimentary roks (3rd ed)*. Blackwell Science.

White, W.B. (1988). *Geomorphology and hydrology of karst terrains*. University Press.

Zak, K., Bruner, P., Bozak, P., Svobodova, M., & Slechta, S. (2007). An usual paleokarst sedimentary rock in the bohemian karst (czech republik) and its regional tectonic and geomorphologic realtionship., *Bullein Geosciences. Vol 82*(3).

© 2026, Program Studi Ilmu Lingkungan Sekolah Pascasarjana UNDIP